Fisheries and Oceans Canada | Pêches et Océans Canada
Science | Sciences

C S A S | **S C C S**

Canadian Science Advisory Secretariat | **Secrétariat canadien de consultation scientifique**

Research Document 2008/087 | **Document de recherche 2008/087**

Not to be cited without permission of the authors * | Ne pas citer sans autorisation des auteurs *

Updated Review of Scientific Information on Impacts of Seismic Survey Sound on Marine Mammals, 2004-present

Évaluation actualisée des renseignements scientifiques relatifs à l'impact des bruits sismiques sur les mammifères marins, de 2004 jusqu'à présent

Patrick Abgrall [1], Valerie D. Moulton [1] and W. John Richardson [2]

[1] LGL Limited, environmental research associates
388 Kenmount Road, P.O. Box 13248, Stn A
St. John's, NL A1B 4A5

[2] LGL Limited, environmental research associates
22 Fisher Street, P.O. Box 280
King City, ON L7B 1A6

* This series documents the scientific basis for the evaluation of fisheries resources in Canada. As such, it addresses the issues of the day in the time frames required and the documents it contains are not intended as definitive statements on the subjects addressed but rather as progress reports on ongoing investigations.

* La présente série documente les bases scientifiques des évaluations des ressources halieutiques du Canada. Elle traite des problèmes courants selon les échéanciers dictés. Les documents qu'elle contient ne doivent pas être considérés comme des énoncés définitifs sur les sujets traités, mais plutôt comme des rapports d'étape sur les études en cours.

Research documents are produced in the official language in which they are provided to the Secretariat.

Les documents de recherche sont publiés dans la langue officielle utilisée dans le manuscrit envoyé au Secrétariat.

This document is available on the Internet at:

Ce document est disponible sur l'Internet à:

http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas/

ISSN 1499-3848 (Printed / Imprimé)
© Her Majesty the Queen in Right of Canada, 2009
© Sa Majesté la Reine du Chef du Canada, 2009

Canada

ABSTRACT

This document provides an updated review of recent scientific information on the effects of seismic survey sound from airgun(s) on marine mammals. It reviews conclusions in the Canadian Science Advisory Secretariat (CSAS) Habitat Status Report 2004/002 and describes published information that has become available since 2004 (through February 2008). The types of impacts reviewed closely follow those outlined in the original CSAS Habitat Status Report and include mortality and physical effects, direct behavioural effects, functional consequences of physical and behavioural effects, chronic effects, and indirect effects.

The review of ***mortality and physical effects*** considers strandings/mortality, hearing impairment, and non-auditory effects. There is no conclusive evidence that airgun pulses cause stranding or death in marine mammals, or non-auditory effects (e.g., gas bubble formation). However, incidents involving beaked whale strandings near naval exercises which used mid-frequency sonar suggest a need for caution in conducting seismic surveys in areas occupied by beaked whales. A key paper (Southall et al. 2007) provides new recommendations for injury criterion in marine mammals exposed to sound. Permanent threshold shift (PTS) in hearing is recommended as an injury criterion. On a SEL (sound exposure level) basis, there is a risk of PTS when received sound levels exceed 15 dB above the SEL which may elicit temporary threshold shift (TTS) in hearing. On a peak pressure basis, sounds might cause immediate PTS if received sound levels exceed 6 dB above TTS_{peak} threshold. For exposure to multiple pulses like those from airgun(s), PTS is assumed to occur if either of the following SEL or peak pressure criterion are exceeded:

- Cetaceans: ~198 dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$ or 230 dB re 1 µPa (peak)
- Pinnipeds: ~186 dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$ or 218 dB re 1 µPa (peak)

The ***direct behavioural effects*** considered include displacement and migratory diversion, changes in dive and respiratory patterns, changes in social behaviour, and changes in vocalization patterns. Baleen whales generally tend to avoid at least the immediate area around operating airguns, but avoidance radii are quite variable. Bowhead and gray whales in summer feeding habitat often exhibit only localized avoidance of airgun sources. Dolphins show variable responses to seismic surveys but seem more responsive than suspected earlier. Beluga whales exhibited 10-20 km avoidance of a seismic vessel; received sound levels were estimated at 150-130 dB re 1 µPa (rms). In contrast, there is little evidence that sperm whales avoid seismic surveys and a study of ringed seals concluded that they showed very limited avoidance of an operating airgun array. Dive and respiratory patterns vary in response to seismic exposure. Some preliminary analyses suggest that foraging attempts by sperm whales in the Gulf of Mexico decrease during seismic exposure. There are also variable results reported for changes in vocalization patterns of marine mammals in response to seismic sounds. Some baleen and toothed whales continued calling in the presence of seismic operations while others stopped calling and resumed after the survey.

Very little information addresses the potential for ***functional consequences of physical and behavioural effects***, ***chronic effects***, and ***indirect effects*** of seismic survey sound on marine mammals. Masking effects of pulsed sounds on marine mammal calls another natural sounds are expected to be limited, although there are very few specific data on this.

RÉSUMÉ

Le document offre une évaluation actualisée des renseignements scientifiques relatifs aux effets sur les mammifères marins du bruit que produisent les canons à air employés pour les levés sismiques. Ses auteurs reviennent sur les conclusions du Rapport sur l'état des habitats 2004/002 du Secrétariat canadien de consultation scientifique (SCCS) (MPO, 2004a) et décrivent les renseignements parus depuis 2004 (jusqu'en février 2008). Les types d'incidences examinés suivent de près ceux décrits dans le Rapport sur l'état des habitats du SCCS. Ils comprennent la mortalité et les effets physiques, les effets comportementaux directs, les conséquences fonctionnelles des effets physiques et comportementaux, les effets chroniques et les effets indirects.

L'analyse de l'aspect ***mortalité et effets physiques*** porte sur les échouements et les morts, la perte d'audition et les effets extra-auditifs. On n'a pas de preuve concluante que les impulsions de canon à air provoque l'échouement ou la mort des mammifères marins, ni qu'elles ont des effets extra-auditifs (p. ex. la formation de bulles gazeuses). Cela dit, l'échouement de baleines à bec au voisinage de sites d'exercices navals qui mettaient en jeu des sonars à moyenne fréquence appelle à la prudence lorsqu'il s'agit d'effectuer des levés sismiques dans des zones fréquentées par cette espèce. Un article fondamental (Southall *et al.*, 2007) recommande de nouveaux critères relatifs aux atteintes physiologiques chez les mammifères marins exposés au bruit. Les auteurs recommandent d'inclure la perte d'audition permanente, ou déplacement permanent de seuil (PTS, de l'anglais *permanent threshold shift*), parmi les critères. Du point de vue du niveau d'exposition sonore (SEL – *sound exposure level*), il y a risque de PTS lorsque le niveau sonore perçu dépasse de 15 dB le SEL susceptible de produire une perte d'audition temporaire, ou déplacement temporaire de seuil (TTS, de l'anglais *temporary threshold shift*). Du point de vue de la pression de crête, il peut y avoir perte d'audition permanente immédiate, si le niveau sonore perçu dépasse de 6 dB la limite inférieure du $TTS_{crête}$. Dans le cas d'une exposition à des impulsions multiples comme celles émises par des canons à air, on suppose que le PTS survient si soit le critère de SEL, soit le critère de pression de crête qui suivent sont dépassés :

- Cétacés : ~198 dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$ ou 230 dB re 1 µPa (crête);
- Pinnipèdes : ~186 dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$ ou 218 dB re 1 µPa (crête).

Les ***effets comportementaux directs*** pris en considération comprennent le déplacement et la déviation des voies migratoires, ainsi que la modification des régimes de plongée et de respiration, du comportement social et des vocalisations. Les baleines à fanons évitent généralement les parages immédiats des canons à air en activité, mais le rayon d'évitement varie beaucoup. Les baleines boréales et les baleines grises qui se trouvent dans leurs aires d'alimentation estivales n'ont souvent qu'une réaction d'évitement localisé. Les dauphins ont des réponses variées aux levés sismiques, mais ils semblent réagir davantage qu'on le soupçonnait. Les bélugas étudiés ont évité les navires sismiques dans un rayon de 10 à 20 km; les niveaux sonores perçus étaient estimés à entre 150 et 130 dB re 1 µPa (rms). Par contre, il y a peu d'indications que le cachalot macrocéphale évite les tirs sismiques, et une étude sur des phoques annelés a conclu qu'ils manifestaient une réaction très limitée d'évitement face à une batterie de canons à air en activité. Les régimes de plongée et de respiration varient en réaction à l'exposition à des bruits sismiques. D'après certaines analyses préliminaires, la quête de nourriture de cachalots macrocéphales dans le golfe du Mexique diminue durant les tirs. On rapporte des résultats variés pour ce qui est des changements dans les vocalisations des mammifères marins en réponse aux bruits sismiques. Certaines baleines à fanons et baleines à dents ont continué leurs appels au cours d'opérations sismiques, tandis que d'autres les ont interrompus pour les reprendre quand les levés se sont terminés.

On a très peu de renseignements sur les ***conséquences fonctionnelles des effets physiques et comportementaux***, les ***effets chroniques*** et les ***effets directs*** éventuels des bruits sismiques sur les mammifères marins. On suppose que les effets de masque des impulsions sur les appels des mammifères marins et sur d'autres sons naturels sont limités, mais il y a peu de données précises sur le sujet.

INTRODUCTION

The following document provides an updated review of recent scientific information on the effects of seismic survey sound from airgun(s) on marine mammals (i.e., data that became available from 2004 through early 2008). It reviews conclusions in the Canadian Science Advisory Secretariat (CSAS) Habitat Status Report 2004/002 (DFO 2004a) and describes published information that has become available since 2004. Lawson and McQuinn (2004) highlighted much of the background information relating to the effects of seismic sounds on marine mammals up to 2004. Due to the limited information on the subject, conference abstracts, papers, and other unpublished or "grey literature" that have often not been externally or peer-reviewed are included, in addition to peer-reviewed literature. Also, in some instances, literature published prior to 2004 is cited for contextual purposes. Additional recent reviews of the effects of sound from seismic surveys, and sources of anthropogenic noise in general, on marine mammals can be found in Gordon et al. (2004), NRC (2005), Nowacek et al. (2007), Southall et al. (2007), Weilgart (2007), and Tyack (2008).

INTRODUCTION

Le présent document offre une évaluation actualisée des renseignements scientifiques relatifs aux effets sur les mammifères marins du bruit que produisent les canons à air employés pour les levés sismiques. Ses auteurs reviennent sur les conclusions du Rapport sur l'état des habitats 2004/002 du Secrétariat canadien de consultation scientifique (SCCS) (MPO, 2004a) et décrivent les renseignements parus depuis 2004 et jusqu'au début de 2008. Lawson et McQuinn (2004) ont considéré une bonne partie des renseignements de base concernant les effets des ondes sismiques sur les mammifères marins jusqu'en 2004. Comme les informations sur le sujet sont peu nombreuses, nous incluons, outre les publications évaluées par les pairs, une « littérature grise » qui, souvent, n'a pas fait l'objet d'un examen externe ou d'une révision par des spécialistes – résumés de conférence, communications et d'autres documents non publiés. Parfois, pour fournir un contexte, nous citons des documents publiés avant 2004. D'autres analyses documentaires ont été faites récemment des effets du bruit produit par les levés sismiques, et des bruits anthropiques en général, sur les mammifères marins. Citons Gordon *et al.* (2004), NRC (2005), Nowacek *et al.* (2007), Southall *et al.* (2007), Weilgart (2007) et Tyack (2008).

IMPACTS OF SEISMIC SOUND ON MARINE MAMMALS

Mortality and Physical Effects

Strandings and Mortality

DFO (2004a) concluded that "although whale strandings have been linked to exposure to anthropogenic sound, exposure to seismic sound is considered unlikely *to cause direct marine mammal mortality".*

Marine mammals close to underwater detonations of high explosives can be killed or severely injured, and the auditory organs are especially susceptible to injury (Ketten et al. 1993; Ketten 1995). Airgun pulses are less energetic and have slower rise times, and there is no proof that they can cause serious injury, death, or stranding even in the case of large airgun arrays. However, the association of mass strandings of beaked whales with naval exercises and, in one case, a seismic survey, has raised the possibility that beaked whales exposed to strong "pulsed" sounds may be especially susceptible to injury and/or behavioural reactions that can lead to stranding.

Strandings and mortality may be due to various noise-related causes, including (1) swimming in avoidance of a sound into shallow water; (2) a change in behaviour (such as a change in dive profile, staying at depth longer than normal, or remaining at the surface longer than normal) that might contribute to tissue damage, gas bubble formation, hypoxia, cardiac arrhythmia, hypertensive hemorrhage or other forms of trauma; (3) a physiological change such as a vestibular response leading to a behavioural change or stress-induced hemorrhagic diathesis, leading in turn to tissue damage; and (4) tissue damage directly from sound exposure, such as through acoustically mediated bubble formation and growth or acoustic resonance of tissues. There are

IMPACT DES BRUITS SISMIQUES SUR LES MAMMIFÈRES MARINS

Mortalité et effets physiques

Échouements et morts

Le MPO (2004a) conclut que « même si les échouements de baleines ont été liés à l'exposition à des sons anthropiques, on considère qu'il est peu probable que l'exposition à des bruits sismiques cause la mortalité directe de mammifères marins ».

Les mammifères marins qui se trouvent à proximité d'une détonation sous-marine d'explosifs peuvent en mourir ou être gravement blessés, et leurs organes auditifs sont particulièrement fragiles (Ketten *et al.*, 1993; Ketten, 1995). Les impulsions des canons à air sont moins puissantes et ont un temps de montée plus long; rien ne prouve qu'elles peuvent entraîner des blessures graves, la mort ou l'échouement, même lorsque de grosses batteries sont employées. Cependant, l'association d'échouements massifs de baleines à bec avec des exercices navals et, dans un cas, avec une étude sismique, a montré la possibilité que l'exposition à de forts signaux sonores « impulsionnels » rende ces cétacés particulièrement vulnérables à des atteintes physiologiques et/ou comportementales qui peuvent les amener à s'échouer.

Diverses causes attribuables à des perturbations sonores peuvent expliquer les échouements et les morts : (1) les animaux nagent vers les eaux peu profondes pour s'éloigner de la source; (2) la perturbation provoque un changement de comportement (par exemple, le profil de plongée se modifie, les animaux restant en profondeur ou à la surface plus longtemps que d'habitude) susceptible de provoquer divers traumatismes – lésion des tissus, embolie gazeuse, hypoxie, arythmie cardiaque, hémorragie hypertensive ou autres; (3) un changement physiologique, telle une réaction du système vestibulaire, amenant une modification du comportement ou une diathèse hémorragique induite par le stress, laquelle amène une lésion des tissus; (4) des lésions directement imputables à l'exposition sonore, en raison des bulles de gaz

increasing indications that gas-bubble disease, induced in supersaturated tissue by a behavioural response to acoustic exposure, could be a pathologic mechanism for the strandings and mortality of some deep-diving cetaceans exposed to sonar, although the evidence of a causal connection remains circumstantial (Cox et al. 2006; Southall et al. 2007).

Of concern for cetaceans, particularly beaked whales, is that tissue damage and live strandings may be induced at received sound levels that are lower than had previously been anticipated and, in particular, at levels lower than those that induce auditory damage (e.g., reviewed in Dolman and Simmonds 2006). The growing evidence that mid-frequency sonar is associated with certain strandings and mortality of beaked whales (Cox et al. 2006; D'Spain et al. 2006) has raised concern about the possibility that seismic surveys might at times have similar effects.

Seismic pulses and mid-frequency sonar signals are quite different. Sounds produced by airgun arrays are broadband impulses with most of the energy below 1 kHz. Typical military mid-frequency sonars emit non-impulse sounds at frequencies of 2–10 kHz, generally with a relatively narrow bandwidth at any one time (though the frequency may change over time). Thus, it is not appropriate to assume that there is a direct connection between the effects of military sonar and seismic surveys on marine mammals. However, evidence that sonar signals can, in special circumstances, lead (at least indirectly) to physical damage and mortality (e.g., Jepson et al. 2003; Fernández et al. 2004, 2005a; Cox et al. 2006) suggests that caution is warranted when dealing with exposure of marine mammals to any high-intensity pulsed sound.

qui se forment et augmentent ou de la résonance acoustique dans les tissus. Il y a de plus en plus d'indications que l'embolie gazeuse, qui se constitue dans un tissu sursaturé par suite d'une réaction comportementale à une exposition acoustique, pourrait être un mécanisme pathologique de l'échouement et de la mort de certains cétacés à plongées profondes exposés à des sonars, bien que les preuves d'un lien causal demeurent circonstanciels (Cox *et al.*, 2006; Southall *et al.*, 2007).

Ce qui préoccupe chez les cétacés, en particulier chez les baleines à bec, est que les lésions des tissus et les échouements d'animaux vivants seraient provoqués par des niveaux sonores captés plus faibles que prévu et, en particulier, plus faibles que ceux qui produisent des dommages auditifs (voir notamment l'analyse de Dolman et Simmonds, 2006). Devant les preuves s'accumulant qu'un sonar à moyenne fréquence aurait joué un rôle dans l'échouement et la mort de baleines à bec (Cox *et al.*, 2006; D'Spain *et al.*, 2006), on craint que les levés sismiques puissent parfois avoir des effets analogues.

Les impulsions sismiques et les signaux sonars de moyenne fréquence sont très différents. Les sons produits par les batteries de canons à air sont des impulsions large bande, dont l'essentiel de l'énergie est émise sous 1 kHz. Les sonars militaires de moyenne fréquence émettent habituellement des signaux non impulsionnels à des fréquences d'entre 2 et 10 kHz, en général dans une bande plutôt étroite à un moment donné (mais la fréquence peut changer avec le temps). Ainsi, il ne convient pas de présumer qu'il y a un lien direct entre les effets des sonars militaires et ceux des dispositifs sismiques sur les mammifères marins. Cela dit, les indications selon lesquelles les signaux sonars peuvent mener, dans des circonstances particulières, du moins indirectement, à des dommages physiques et à des décès (voir notamment Jepson *et al.*, 2003; Fernández *et al.*, 2004, 2005a; Cox *et al.*, 2006) incitent à la prudence lorsqu'il est question d'exposer les mammifères marins à toute impulsion sonore de forte

intensité.

There is no conclusive evidence of cetacean strandings as a result of exposure to seismic surveys. Speculation concerning a possible link between seismic surveys and strandings of humpback whales in Brazil (Engel et al. 2004) was not well founded (International Association of Geophysical Contractors [IAGC] 2004; International Whaling Commission [IWC] 2007). In September 2002, there was a stranding of two Cuvier's beaked whales in the Gulf of California, Mexico, when the Lamont-Doherty Earth Observatory (L-DEO) seismic vessel R/V Maurice Ewing was operating a 20-airgun, 8490-in^3 airgun array in the area. It is uncertain when the whales came ashore and thus, how close the seismic vessel had been when the whales stranded. However, the seismic vessel was on a survey line approaching the stranding site and had a closest point of approach of 33.3 km around the time the live-stranded beaked whales were discovered by fishermen (Hildebrand 2005). The link between the stranding and the seismic surveys was inconclusive and not based on any physical evidence (Hogarth 2002; Yoder 2002). Nonetheless, that plus the incidents involving beaked whale strandings near naval exercises involving use of mid-frequency sonar suggests a need for caution in conducting seismic surveys in areas occupied by beaked whales.

Il n'y a pas de preuve concluante que des cétacés se seraient échoués après avoir été exposés à des bruits sismiques. L'hypothèse d'un lien possible entre des levés sismiques et l'échouement de rorquals à bosse au Brésil (Engel *et al.*, 2004) n'était pas bien fondée (International Association of Geophysical Contractors [IAGC], 2004; International Whaling Commission [IWC], 2007). En septembre 2002, deux baleines à bec de Cuvier se sont échouées dans le golfe de Californie, sur les côtes mexicaines, au moment où le navire sismique *Maurice Ewing* de l'observatoire terrestre Lamont-Doherty (L-DEO) effectuait des tirs au moyen d'une batterie de 20 canons à air de 8 490 po^3 dans le secteur. On ne sait pas avec exactitude quand les baleines se sont échouées et donc à quelle distance se trouvait le navire sismique. Toutefois, celui-ci se trouvait sur une ligne de levé approchant le site d'échouement et son point de rapprochement maximal était de 33,3 km vers le moment où des pêcheurs ont découvert les baleines échouées encore vivantes (Hildebrand, 2005). Le rapport établi entre l'échouement et les études sismiques n'était pas concluant, et aucune preuve matérielle ne le corroborait (Hogarth, 2002; Yoder, 2002). Néanmoins, cet incident et les échouements de baleines à bec dans les parages de sites d'exercices navals faisant appel à des sonars de moyenne fréquence incitent à la prudence lorsqu'on effectue des levés sismiques dans des secteurs occupés par des baleines à bec.

Hearing Impairment

DFO (2004a) determined that the significance of TTS effects, were they to occur, are likely to be unimportant, unless it resulted in PTS; or other threats that normally could be avoided by acoustic means, such as those from predators or entanglement in fishing gear, occur concurrently.

Temporary or permanent hearing

Perte d'audition

D'après le MPO (2004a), le degré d'importance des effets d'élévation temporaire du seuil auditif, s'ils se produisent, est probablement insignifiant, à moins qu'ils résultent en un déplacement permanent du seuil ou que se matérialisent au même moment d'autres menaces que les mammifères marins évitent normalement par des moyens acoustiques, notamment des prédateurs ou des engins de pêche dans lesquels ils s'enchevêtrent.

Une perte temporaire ou permanente d'audition

impairment is a possibility when marine mammals are exposed to very strong sounds (Goold and Coates 2006), and temporary threshold shift (TTS) has been demonstrated and studied in certain captive odontocetes and pinnipeds exposed to strong sounds (reviewed in Southall et al. 2007). However, there has been no specific documentation that TTS let alone PTS occurs when marine mammals are exposed to sequences of airgun pulses under realistic field conditions. Current U.S. National Marine Fisheries Service (NMFS) policy regarding exposure of marine mammals to high-level sounds is that, for situations under U.S. jurisdiction, cetaceans and pinnipeds should not be exposed to impulsive sounds with received levels ≥180 and 190 dB re 1 μPa_{rms} respectively (NMFS 2000). Those criteria have been used in establishing the safety (=shutdown) radii for numerous seismic surveys in both U.S. and Canadian waters. However, those criteria were established before there was any information about the minimum received levels of sounds necessary to cause auditory impairment in marine mammals. As discussed below,

- the 180-dB criterion for cetaceans is probably quite precautionary, i.e. lower than necessary to avoid temporary threshold shift (TTS), let alone permanent auditory injury, at least for delphinids and similar species for which TTS measurements are available;

- the 190-dB criterion for pinnipeds may not be as precautionary, at least for harbour seals; there are indications that the TTS threshold in the harbour seal is lower than in odontocetes (Southall et al. 2007:443);

- the level associated with the onset

est possible quand les mammifères marins sont exposés à des sons très forts (Goold et Coates, 2006). On a montré et étudié un déplacement temporaire de seuil (ou TTS, de l'anglais *temporary threshold shift*) chez certains odontocètes et pinnipèdes en captivité qui avaient été exposés à des sons forts (analyse de Southall *et al.*, 2007). Cela dit, on ne trouve aucune indication précise dans la documentation d'une perte d'audition temporaire et encore moins permanente chez les mammifères marins exposés à des séquences d'impulsions provenant de canons à air dans des conditions réalistes d'emploi. La politique en vigueur du National Marine Fisheries Service (NMFS) des États-Unis concernant l'exposition des mammifères marins à des niveaux sonores élevés précise que, dans les situations qui ressortissent aux États-Unis, les cétacés et les pinnipèdes ne devraient pas être exposés à des impulsions sonores dont les niveaux perçus seraient respectivement de ≥ 180 et 190 décibels rapportés à une pression efficace de 1 micropascal (expression notée dB re 1 μPa_{rms}) (NMFS, 2000). Ces critères ont servi à définir le rayon de sécurité (= arrêt) de nombreux levés sismiques dans les eaux canadiennes et américaines. Cependant, ils ont été établis avant qu'on dispose d'informations sur les niveaux sonores minimaux de réception nécessaires pour occasionner une perte d'audition chez les mammifères marins. Comme il est indiqué plus bas,

- Le critère de 180 dB pour les cétacés est probablement très prudent, c.-à-d. inférieur au niveau nécessaire pour éviter un TTS, à plus forte raison une perte d'audition permanente, du moins chez les delphinidés et espèces similaires pour lesquelles on dispose de mesures de TTS.

- Le critère de 190 dB à l'égard des pinnipèdes n'est peut-être pas aussi prudent, du moins pour les phoques communs; il semble que le TTS se produise à un niveau inférieur chez le phoque commun que chez les odontocètes (Southall *et al.*, 2007:443).

- Le niveau à partir duquel se produit un

of TTS is often considered to be a level below which there is no danger of permanent damage; TTS is a normal and temporary phenomenon occurring when animals (and humans) are exposed to strong sounds, and it does not constitute injury (e.g., Kryter 1985; Southall et al. 2007).

- the minimum sound level necessary to cause permanent threshold shift (PTS) is higher, by a variable and generally unknown amount, than the level that induces barely-detectable TTS; the actual PTS threshold is likely to be well above the level causing onset of TTS (Southall et al. 2007).

NMFS is developing new noise exposure criteria for marine mammals that account for the available scientific data on TTS, the expected offset between the TTS and PTS thresholds, differences in the acoustic frequencies to which different marine mammal groups are sensitive, and other relevant factors. Preliminary information about this process, and about the possible structure of the new criteria, was given by NMFS (2005); D. Wieting in http://mmc.gov/sound/plenary2/pdf/plenary2summaryfinal.pdf; and Miller et al. (2005b). Detailed recommendations for new science-based noise exposure criteria for marine mammals, frequency weighting procedures, and related matters were published in early 2008 (Southall et al. 2007).

Southall et al. (2007) suggest that thresholds for injury (and behavioural responses) should be examined separately for five functional hearing groups: low-frequency cetaceans (mysticetes, for which the functional

TTS est souvent considéré comme un niveau en deçà duquel il n'y a pas de danger de dommage permanent; le TTS est un phénomène normal et provisoire qui se produit lorsque des animaux (et des humains) sont exposés à des bruits forts, et il ne constitue pas une lésion (voir notamment Kryter, 1985; Southall *et al.*, 2007).

- Le niveau sonore minimal nécessaire pour entraîner un déplacement permanent de seuil (ou PTS, de l'anglais *permanent threshold shift*) est plus élevé – la différence varie et elle est mal connue – que le niveau qui provoque un TTS à peine décelable; en réalité, la limite inférieure de la perte d'audition permanente est vraisemblablement beaucoup plus élevée que celle d'une perte d'audition temporaire (Southall et *al.*, 2007).

Le NMFS définit de nouveaux critères d'exposition au bruit chez les mammifères marins qui tiennent compte des informations scientifiques dont on dispose maintenant sur le TTS, l'écart attendu entre le niveau d'apparition d'une perte d'audition temporaire et celui d'une perte permanente, les différences de fréquences acoustiques auxquels divers groupes de mammifères marins sont sensibles et d'autres facteurs pertinents. le NMFS (2005), D. Wieting (http://mmc.gov/sound/plenary2/pdf/plenary2summaryfinal.pdf) et Miller *et al.* (2005b) ont donné les renseignements préliminaires sur la démarche et sur la structure possible des nouveaux critères. Des recommandations détaillées ont été publiées au début de 2008 (Southall *et al.*, 2007) au sujet des nouveaux critères scientifiques d'exposition au bruit chez les mammifères marins, des procédés de pondération des fréquences et de sujets connexes.

Selon Southall *et al.* (2007), les valeurs limites conduisant à des atteintes physiologiques (et à des modifications de comportement) devraient être examinées séparément pour cinq groupes d'acuité auditive : cétacés basse fréquence (mysticètes, dont le champ fonctionnel

hearing range is concluded to be 7 Hz to 22 kHz); mid-frequency cetaceans (the majority of odontocetes, 150 Hz to 160 kHz); high-frequency cetaceans (remaining odontocetes, 200 Hz to 180 kHz); pinnipeds in water (75 Hz to 75 kHz) and pinnipeds in air (75 Hz to 30 kHz). This review discusses low-frequency cetaceans (mysticetes), mid- and high-frequency cetaceans collectively, under "odontocetes", and pinnipeds in water. Seismic surveys are assumed to be of little relevance to "pinnipeds in air".

d'audibilité se situerait entre 7 Hz et 22 kHz), moyenne fréquence (la plupart des odontocètes; champ entre 150 Hz et 160 kHz) et haute fréquence (le reste des odontocètes; champ entre 200 Hz et 180 kHz), les pinnipèdes dans l'eau (entre 75 Hz et 75 kHz) et les pinnipèdes dans l'air (entre 75 Hz et 30 kHz). Nous examinons les cétacés basse (mysticètes), moyenne et haute fréquences collectivement dans la catégorie « odontocètes » ainsi que les pinnipèdes dans l'eau. Nous supposons que les levés sismiques touchent peu les « pinnipèdes dans l'air ».

Several aspects of the monitoring and mitigation measures that are now often implemented during seismic survey projects are designed to detect marine mammals occurring near the airgun array, and to avoid exposing them to sound pulses that might, at least in theory, cause hearing impairment (e.g., Barlow and Gisiner 2006; Holst et al. 2006; McCauley and Hughes 2006; Weir and Dolman 2007). In addition, many cetaceans show some avoidance of the area with ongoing seismic operations (see Displacement and Migratory Diversion section, below). In these cases, the avoidance responses of the animals themselves will reduce or (most likely) avoid the possibility of hearing impairment.

Plusieurs aspects des mesures de surveillance et d'atténuation des effets qui sont maintenant souvent appliquées au cours des campagnes sismiques sont destinés à déceler la présence de mammifères marins près des batteries de canons à air et à éviter d'exposer ces animaux à des impulsions sonores qui pourraient, du moins en théorie, causer une baisse d'audition (voir notamment Barlow et Gisiner, 2006; Holst *et al.*, 2006; McCauley et Hughes, 2006; Weir et Dolman, 2007). En outre, de nombreux cétacés évitent la zone des tirs sismiques (voir plus bas la section « Déplacement et déviation des voies migratoires »). Dans ces cas, la réaction d'évitement des animaux réduira ou (très probablement) annulera la possibilité d'une perte d'audition.

Temporary Threshold Shift (TTS).—TTS is the mildest form of hearing impairment that can occur during exposure to a strong sound (Kryter 1985). While experiencing TTS, the hearing threshold rises and a sound must be stronger in order to be heard. At least in terrestrial mammals, TTS can last from minutes or hours to (in cases of strong TTS) days. For sound exposures at or somewhat above the TTS threshold, hearing sensitivity in both terrestrial and marine mammals recovers rapidly after exposure to the noise ends. TTS is not considered an injury (Southall et al. 2007). Few data on sound levels and durations necessary to elicit mild TTS have been obtained for marine mammals,

Déplacement temporaire de seuil (TTS) – le TTS est la forme la plus légère de déficit auditif que peut produire l'exposition à un son fort (Kryter, 1985). Il s'agit d'une élévation récupérable du seuil d'audition; le son doit alors être plus fort pour être entendu. Chez les mammifères terrestres, du moins, le TTS peut durer des minutes ou des heures, voire (dans les cas d'un TTS prononcé) des jours. Chez les mammifères terrestres et marins, si le bruit est égal ou légèrement supérieur à celui qui provoque la perte temporaire d'audition, la sensibilité auditive est rapidement récupérée une fois que l'exposition au bruit cesse. Le TTS n'est pas considéré comme une atteinte physiologique (Southall *et al.*, 2007). On a obtenu peu de données sur les niveaux et les durées du son nécessaires pour produire un

and none of the published data concern TTS elicited by exposure to multiple pulses of sound. Available data on TTS in marine mammals are reviewed in some detail by Southall et al. (2007).

Mysticetes: There are no data, direct or indirect, on levels or properties of airgun (or other) sounds that are required to induce TTS in mysticetes. The frequencies to which mysticetes are most sensitive are lower than those to which odontocetes are most sensitive, and natural background noise levels at those low frequencies tend to be higher. As a result, auditory thresholds of baleen whales within their frequency band of best hearing are believed to be higher (less sensitive) than are those of odontocetes at their best frequencies (Clark and Ellison 2004). From this, it is suspected that received levels causing TTS onset may also be higher in mysticetes than in odontocetes. In any case, Southall et al. (2007) conclude that it would be precautionary to assume that TTS would not occur in mysticetes at received levels any lower than those causing TTS in odontocetes.

Odontocetes: There are empirical data on the sound exposures that elicit onset of TTS in captive bottlenose dolphins and belugas. The majority of these data concern non-impulse sound, but there are some limited published data concerning TTS onset upon exposure to a single pulse of sound from a watergun (Finneran et al. 2002). A detailed review of these data can be found in Southall et al.(2007). The following summarizes some of the key results.

There is recent information corroborating earlier expectations that the effect of exposure to strong transient sounds is closely related to the total amount of acoustic energy that is received. Finneran et al.(2005) examined the effects of tone duration on TTS in bottlenose dolphins.

faible TTS chez les mammifères marins, et aucune information publiée ne concerne le TTS provoqué par l'exposition à des impulsions sonores multiples. Southall *et al.* (2007) analysent dans un certain détail les données disponibles sur le TTS chez les mammifères marins.

Mysticètes : Il n'y a pas de données, directes ou indirectes, sur les niveaux ou les propriétés des sons produits par des canons à air (ou d'autres sources) qui produiront un TTS chez les mysticètes. Les fréquences auxquelles les mysticètes sont le plus sensibles sont inférieures à celles auxquelles les odontocètes sont le plus sensibles, et les niveaux sonores de fond à ces basses fréquences tendent à être plus élevés. Par conséquent, on croit que les seuils d'audition des baleines à fanons dans la plage des fréquences qu'ils entendent le mieux sont plus élevés (sensibilité moindre) que les seuils des odontocètes aux fréquences qu'elles entendent le mieux (Clark et Ellison, 2004). Ce qui amène à présumer que les niveaux perçus qui occasionnent un TTS pourraient aussi être plus élevés chez les mysticètes que chez les odontocètes. En tout cas, Southall *et al.* (2007) concluent qu'il serait prudent de supposer que le TTS ne se produira pas chez les mysticètes à un niveau perçu plus faible que celui qui cause un TTS chez les odontocètes.

Odontocètes : Il existe des données empiriques sur les expositions au bruit qui provoquent le TTS chez les dauphins à gros nez et les bélugas en captivité. L'essentiel des données porte sur les bruits non impulsionnels, mais quelques données ont été publiées sur le TTS provoqué par l'exposition à une seule impulsion provenant d'un canon à eau (Finneran *et al.*, 2002). Southall *et al.* (2007) font un examen détaillé de ces données. Voici un résumé des principaux résultats.

Des informations récentes corroborent les prévisions antérieures que l'effet de l'exposition à de forts bruits transitoires est étroitement lié à la quantité totale d'énergie acoustique captée. Finneran *et al.* (2005) ont examiné les effets de la durée du signal sonore sur le TTS chez les dauphins à gros nez. Les dauphins à gros nez

Bottlenose dolphins were exposed to 3 kHz tones for periods of 1, 2, 4 or 8 s, with hearing tested at 4.5 kHz. For 1-s exposures, TTS occurred with SELs of 197 dB, and for exposures >1 s, SEL ≥195 dB resulted in TTS. (SEL is equivalent to energy flux, in dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$) At an SEL of 195 dB, the mean TTS (4 min after exposure) was 2.8 dB. Finneran et al. (2005) suggested that an SEL of 195 dB is the likely threshold for the onset of TTS in dolphins and beluga exposed to mid-frequency tones of durations 1-8 s (i.e., TTS onset occurs at a near-constant SEL, independent of exposure duration). That implies that a doubling of exposure time results in a 3 dB lower TTS threshold.

ont été exposés à des signaux de 3 kHz pour des périodes de 1, 2, 4 ou 8 secondes, et on a testé leur ouïe à 4,5 kHz. Le TTS se produisait à un niveau d'exposition sonore (SEL – *sound exposure level*) de 197 dB à 1 seconde. Dans le cas d'expositions plus longues (>1 s), un SEL ≥195 dB produisait un TTS. (Le SEL équivaut au flux d'énergie en dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$). À un SEL de 195 dB, le TTS moyen (4 minutes après l'exposition) était de 2,8 dB. Finneran *et al.* (2005) ont avancé qu'un SEL de 195 dB est le niveau probable d'apparition du TTS chez les dauphins et les bélugas exposés à des signaux sonores de fréquence moyenne et d'une durée d'entre 1 et 8 secondes (c.-à-d. que le TTS se produit à un SEL presque constant, indépendamment de la durée d'exposition). Ainsi, doubler la durée d'exposition abaisse de 3 dB le seuil de perte d'audition temporaire.

Mooney *et al.* (2005) exposed a bottlenose dolphin to octave-band noise ranging from 4 to 8 kHz at SPLs of 160 to 172 dB re 1 µPa for periods of 1.8 to 30 min. Recovery time depended on the shift and frequency, but full recovery always occurred within 40 min. Consistent with the results of Finneran et al.(2005) based on shorter exposures, Mooney *et al.* reported that to induce TTS in a bottlenose dolphin, there is an inverse relationship of exposure time and SPL; as a first approximation, as exposure time was halved, an increase in noise SPL of 3 dB was required to induce the same amount of TTS. In other words, for toothed whales receiving single short exposures to non-impulse sound, the TTS threshold appears to be, to a first approximation, a function of the total energy received (Finneran et al. 2002, 2005).

Mooney *et al.* (2005) ont exposé un dauphin à gros nez à des niveaux sonores par bandes d'octaves d'entre 4 et 8 kHz à un niveau de pression acoustique (SPL – *sound pressure level*) de 160 à 172 dB re 1 µPa pour des périodes de 1,8 à 30 min. Le temps de récupération dépendait du décalage et de la fréquence, mais la récupération était toujours complète dans les 40 minutes. Mooney *et al.* ont indiqué que pour produire le TTS chez le dauphin à gros nez, il y avait un rapport inverse entre la durée d'exposition et le SPL, ce qui vient confirmer les résultats de Finneran *et al.* (2005) obtenus après des expositions plus courtes; comme approximation première, en réduisant de moitié la durée d'exposition, il fallait augmenter la pression acoustique de 3 dB pour provoquer le même TTS. En d'autres mots, dans le cas des baleines à dents soumises à une exposition courte à des signaux non impulsionnels, le seuil de perte d'audition temporaire semble être, à première approximation, fonction de l'énergie totale perçue (Finneran *et al.*, 2002, 2005).

The TTS threshold for odontocetes exposed to a single impulse (from a watergun) appeared to be somewhat lower than for exposure to non-impulse sound. This was expected, based on evidence from terrestrial mammals showing that broadband pulsed sounds

Chez des odontocètes exposés à une impulsion unique (d'un canon à eau), le TTS se serait produit à un niveau un peu inférieur que dans le cas d'une exposition à un signal non impulsionnel. C'est ce que laissaient présager les données obtenues à l'égard de mammifères terrestres, qui indiquaient que les impulsions en

with rapid rise times have greater auditory effect than do non-impulse sounds (Southall *et al.* 2007). The received energy level of a single seismic pulse that caused the onset of mild TTS in the beluga, as measured without frequency weighting, was ~186 dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$ or 186 dB SEL (Finneran et al. 2002)[1]. Given that the rms level of an airgun pulse (in dB re 1 µPa measured over the duration of the pulse) is typically 10–15 dB higher than the SEL for the same pulse, a single airgun pulse might need to have a received level of ~196–201 dB re 1 μPa_{rms} in order to produce brief, mild TTS. Exposure to several strong seismic pulses that each have received levels near 190 dB_{rms} (175–180 dB SEL) could result in cumulative exposure of ~186 dB SEL and thus slight TTS in a small odontocete, assuming that the TTS threshold upon exposure to multiple pulses is (to a first approximation) a function of the total received pulse energy.

bande large avec front de montée rapide ont un effet plus grand sur l'audition que des signaux non impulsionnels (*Southall et al.*, 2007). Le niveau d'énergie perçu d'une impulsion sismique unique ayant causé un léger TTS chez le béluga, mesuré sans pondération de fréquence, était de ~186 dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$ ou de 186 dB SEL (Finneran *et al.*, 2002)[1]. Comme le niveau efficace (ou niveau rms, de l'anglais *root mean square*) d'une impulsion de canon à air (en dB re 1 µPa mesuré sur la durée de l'impulsion) est habituellement plus élevé de 10 à 15 dB que le niveau d'exposition sonore (SEL) pour la même impulsion, pour qu'une unique impulsion de canon à air produise un léger et bref TTS, il faudrait peut-être que le niveau perçu soit d'environ 196 à 201 dB re 1 μPa_{rms}. L'exposition à plusieurs impulsions sismiques fortes dont chacune aurait un niveau perçu approchant 190 dB_{rms} (175-180 dB SEL) pourrait donner une exposition cumulée de ~186 dB SEL et donc produire un léger TTS chez un petit odontocète, en supposant que la valeur d'apparition d'une perte d'audition temporaire sous l'effet d'une exposition à des impulsions multiples est (en première approximation) fonction de l'énergie impulsionnelle totale captée.

Insofar as we are aware, there are no published data confirming that the auditory effect of a sequence of airgun pulses received by an odontocete is a function of their cumulative energy. Southall et al. (2007) consider that to be a reasonable, but probably somewhat precautionary, assumption. It is precautionary because, based on data from terrestrial mammals, one would expect that a given energy exposure would have somewhat less effect if separated into discrete pulses, with potential opportunity for partial auditory recovery between pulses. However, as

Pour autant que nous sachions, aucune donnée n'a été publiée confirmant que l'effet auditif d'une séquence d'impulsions de canon à air perçues par un odontocète soit fonction de leur énergie cumulée. Southall *et al.* (2007) considèrent l'hypothèse raisonnable, bien que probablement un peu prudente. Prudente, parce que, d'après les données sur les mammifères terrestres, on s'attendrait à ce que l'exposition à une énergie donnée ait un effet moindre si on la divise entre des impulsions distinctes, avec possibilité de récupération partielle de l'audition entre les impulsions. Cependant, la vitesse de récupération du TTS chez les mammifères marins a encore été très

[1] *If the low-frequency components of the watergun sound used in the experiments of Finneran et al. (2002) are downweighted as recommended by Miller et al. (2005a) and Southall et al. (2007) using their M_{mf}-weighting curve, the effective exposure level for onset of mild TTS was 183 dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$ (Southall et al. 2007).*

[1] *Si on sous-pondère les éléments basse fréquence du signal émis par le canon à eau dans les expériences de Finneran et al. (2002), comme le recommandent Miller et al. (2005a) et Southall et al. (2007) au moyen de leur courbe de pondération M_{mf}, le niveau effectif d'exposition provoquant un léger TTS était de 183 dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$ (Southall et al., 2007).*

yet there has been little study of the rate of recovery from TTS in marine mammals, and in humans and other terrestrial mammals the available data on recovery are quite variable. Southall et al. (2007) conclude that - until relevant data on recovery are available from marine mammals - it is appropriate to not to allow for any assumed recovery during the intervals between pulses within a pulse sequence.

peu étudiée, et les données disponibles pour les humains et d'autres mammifères terrestres varient beaucoup. Southall *et al.* (2007) ont conclu qu'il convient – jusqu'à ce qu'on dispose des données utiles sur la récupération chez les mammifères marins – de ne pas supposer qu'il y a récupération dans les intervalles entre les impulsions d'une séquence.

The above TTS information for odontocetes is derived from studies on the bottlenose dolphin and beluga. There is no published TTS information for other types of cetaceans. However, preliminary evidence from a harbour porpoise exposed to airgun sound suggests that its TTS threshold may have been lower (Lucke et al. 2007).

Les informations précitées au sujet du TTS chez les odontocètes proviennent d'études sur le dauphin à gros nez et le béluga. Il n'y a pas de renseignements publiés au sujet du TTS chez d'autres types de cétacés. Néanmoins, les indications préliminaires de l'exposition d'un marsouin commun aux signaux d'un canon à air laissent à penser que la valeur limite du TTS pourrait être plus basse (Lucke *et al.*, 2007).

Additional data are needed to determine the received sound levels at which small odontocetes would start to incur TTS upon exposure to repeated, low-frequency pulses of airgun sound with variable received levels. At the present state of knowledge, it is necessary to assume that the effect is directly related to total energy even though that energy is received in multiple pulses separated by gaps.

Il faut recueillir plus d'informations pour déterminer la limite d'apparition d'un TTS chez des petits odontocètes exposés à des impulsions basse fréquence répétées d'un canon à air, étant donné des niveaux perçus variés. En l'état actuel des connaissances, il faut supposer que l'effet est directement lié à l'énergie totale, même si cette énergie est reçue sous forme d'impulsions multiples séparées par des intervalles.

Pinnipeds: In pinnipeds, TTS thresholds associated with exposure to brief pulses (single or multiple) of underwater sound have not been measured. Initial evidence from more prolonged (non-pulse) exposures suggested that some pinnipeds (harbour seals in particular) incur TTS at somewhat lower received levels than do small odontocetes exposed for similar durations (Kastak et al. 1999, 2005; Ketten et al. 2001). Kastak et al. (2005) reported that the amount of threshold shift increased with increasing SEL in a California sea lion and harbour seal. They noted that, for non-impulse sound, doubling the exposure duration from 25 to 50 min (i.e., a +3 dB change in SEL) had a greater effect on TTS than an increase of 15 dB (95 vs. 80 dB) in

Pinnipèdes : On n'a pas mesuré chez les pinnipèdes le seuil de perte d'audition temporaire associé à l'exposition à de brèves impulsions sonores (uniques ou multiples) sous l'eau. Selon les premières données disponibles sur des expositions plus longues à des signaux non impulsionnels, certains pinnipèdes (le marsouin commun en particulier) éprouvent un TTS à un niveau perçu légèrement inférieur à celui qui provoque une perte d'audition temporaire chez de petits odontocètes exposés pour une durée analogue (Kastak *et al.*, 1999, 2005; Ketten *et al.*, 2001). Kastak *et al.* (2005) indiquent que le déplacement du seuil avait augmenté en même temps que le niveau d'exposition sonore chez une otarie de Californie et un marsouin commun. Ces auteurs ont remarqué que, dans le cas de

exposure level. Mean threshold shifts ranged from 2.9–12.2 dB, with full recovery within 24 hr (Kastak et al. 2005). Kastak et al. (2005) suggested that, for non-impulse sound, SELs resulting in TTS onset in pinnipeds may range from 183 to 206 dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$, depending on the absolute hearing sensitivity.

signaux non impulsionnels, doubler la durée d'exposition de 25 à 50 minutes (c.-à-d. une augmentation du SEL de +3 dB) avait un plus grand effet sur le TTS que l'augmentation de 15 dB (95 dB plutôt que 80) du niveau d'exposition. Les déplacements moyens de seuil allaient de 2,9 à 12,2 dB, l'ouïe se rétablissant complètement dans les 24 heures (Kastak *et al.*, 2005). Kastak *et al.* (2005) avancent que, dans le cas de signaux non impulsionnels, les SEL qui provoquent l'apparition de TTS chez les pinnipèdes se situeraient entre 183 et 206 dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$, le niveau variant selon la sensibilité auditive absolue.

As noted above for odontocetes, it is expected that—for impulse sound—the onset of TTS would occur at a lower cumulative SEL given the assumed greater auditory effect of broadband impulses with rapid rise times. The threshold for onset of mild TTS upon exposure of a harbour seal to impulse sounds has been indirectly estimated as being an SEL of ~171 dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$ (Southall et al. 2007). That would be equivalent to a single pulse with received level ~181–186 dB re 1 μPa_{rms}, or a series of pulses for which the highest rms values are a few dB lower.

Comme dans le cas précité des odontocètes, on s'attend à ce que le TTS apparaisse, sous l'effet d'impulsions, à un SEL cumulatif inférieur, puisqu'on prête aux impulsions en bande large, dont le temps de montée est très bref, un plus grand effet sur l'audition. On a estimé indirectement le niveau d'exposition sonore à partir duquel apparaît un léger TTS chez un phoque commun exposé à des signaux impulsionnels à SEL de ~171 dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$ (Southall *et al.*, 2007). Voilà qui équivaudrait à une impulsion unique avec niveau perçu de ~181–186 dB re 1 μPa_{rms}, ou à une série d'impulsions pour lesquelles les valeurs efficaces les plus fortes sont inférieures de quelques décibels.

At least for non-impulse sounds, TTS onset occurs at appreciably higher received levels in California sea lions and northern elephant seals than in the harbour seal (Kastak et al. 2005). Thus, the first two species would presumably need to be closer to airgun array before TTS would be a possibility. Insofar as we are aware, there are no data to indicate whether the TTS thresholds of other pinniped species are more similar to those of the harbour seal or to those of the two less-sensitive species.

Au moins dans le cas des signaux non impulsionnels, le TTS apparaît à des niveaux perçus sensiblement plus élevés chez l'otarie de Californie et l'éléphant de mer boréal que chez le phoque commun (Kastak *et al.*, 2005). Ainsi, il faudrait sans doute que les deux premières espèces soient plus près de la batterie de canons à air pour qu'un TTS soit possible. Pour autant que nous sachions, on ne dispose pas de données indiquant si la valeur limite du TTS chez d'autres espèces de pinnipèdes s'approche davantage de celles du phoque commun que de celles des deux espèces moins sensibles.

Fissipeds: There are no available data on TTS in sea otters and polar bears. However, TTS is considered unlikely to

Fissipèdes : Il n'y a pas de données sur le TTS chez les loutres de mer et les ours blancs. Cela étant, on considère peu probable qu'ils

occur in sea otters or polar bears if they are on the water surface, given the pressure release effect at the water's surface. Furthermore, sea otters tend to inhabit shallow coastal habitats whereas marine seismic surveys are generally conducted within deeper offshore areas.

Likelihood of Incurring TTS from Airgun Pulses: DFO (2004a) concluded that the significance of TTS on marine mammals exposed to seismic surveys is likely to be unimportant. Most cetaceans show some degree of avoidance of seismic vessels operating an airgun array. It is unlikely that these cetaceans would be exposed to airgun pulses at a sufficiently high level for a sufficiently long period to cause more than mild TTS, given the relative movement of the vessel and the marine mammal. TTS would be more likely in any odontocetes that bow- or wake-ride or otherwise linger near the airguns. However, while bow- or wake-riding, odontocetes would be near the surface where levels of sound pulses are reduced by pressure-release and Lloyd-mirror (interference) effects (see Appendix A). But if bow- or wake-riding animals were to dive intermittently near airguns, they would be exposed to strong sound pulses, possibly repeatedly. If some cetaceans did incur mild or moderate TTS through exposure to airgun sounds in this manner, this would very likely be a temporary and reversible phenomenon. However, it should be noted that even a temporary reduction in hearing sensitivity could be deleterious in the event that, during that period of reduced sensitivity, a marine mammal needed its full hearing sensitivity to detect approaching predators, or for some other reason.

Some pinnipeds show avoidance reactions to airguns, but their avoidance reactions are not as strong or consistent as those of cetaceans. Pinnipeds occasionally seem to be attracted to operating seismic vessels. There are no specific data on TTS thresholds of

subissent un TTS s'ils sont à la surface de l'eau, étant donné la détente de la pression dans l'air. Par ailleurs, les loutres de mer privilégient les habitats côtiers peu profonds, alors que les études sismiques s'effectuent généralement dans les zones plus profondes du large.

Probabilité d'un TTS provoqué par les impulsions d'un canon à air : Le MPO (2004a) a conclu que le degré d'importance des effets des levés sismiques sur le seuil d'audition des mammifères marins exposés serait probablement négligeable. La plupart des cétacés cherchent à éviter les navires sismiques qui font fonctionner une batterie de canons à air. Il est peu probable qu'ils soient exposés à des impulsions assez fortes sur une période assez longue pour leur occasionner davantage qu'un léger TTS, vu le déplacement des navires et des mammifères les uns par rapport aux autres. Le TTS serait plus probable chez les odontocètes qui nagent dans les vagues d'étrave ou le sillage des navires ou qui traînent autrement près des canons à air. Cependant, les odontocètes qui se laissent porter par la vague d'étrave ou nagent dans le sillage d'un navire se trouveraient près de la surface, où les impulsions sont réduites en raison des effets de détente et du miroir de Lloyd (interférences) (voir l'annexe A). Par contre, si ces animaux plongeaient par intermittence près des canons, ils seraient exposés à de fortes impulsions sonores, peut-être à répétition. S'il arrivait que certains cétacés subissent un TTS léger ou moyen suite à une exposition de ce genre aux tirs de canon à air, l'effet serait très probablement provisoire et réversible. Cela dit, il est à remarquer que même une réduction temporaire de la sensibilité auditive pourrait être néfaste si un mammifère marin avait besoin à ce moment-là de toute son acuité pour déceler l'approche de prédateurs ou pour une autre raison.

Certains pinnipèdes cherchent à éviter les canons à air, mais leurs réactions d'évitement ne sont pas aussi fortes ni aussi régulières que celles des cétacés. Les pinnipèdes semblent à l'occasion attirés par les navires sismiques en campagne. Il n'y a pas de données précises sur le niveau auquel

pinnipeds exposed to single or multiple low-frequency pulses. However, given the indications of a lower TTS threshold for the harbour seal than for odontocetes exposed to impulse sound (see above), it is possible that some pinnipeds close to a large airgun array could incur TTS.

apparaît le TTS chez les pinnipèdes exposés à des impulsions basse fréquence uniques ou multiples. Cependant, comme il semble que ce niveau soit plus faible chez le phoque commun que chez les odontocètes exposés à des impulsions sonores (voir plus haut), il est possible que certains pinnipèdes qui se trouvent à proximité d'une grosse batterie de canons à air subissent une perte d'audition temporaire.

NMFS (1995, 2000) concluded that cetaceans and pinnipeds should not be exposed to pulsed under-water noise at received levels exceeding, respectively, 180 and 190 dB re 1 μPa_{rms}. Those sound levels have not been considered to be the levels above which TTS might occur. Rather, they were the received levels above which, in the view of a panel of bioacoustics specialists convened by NMFS before TTS measurements for marine mammals started to become available, one could not be certain that there would be no injurious effects, auditory or otherwise, to marine mammals. As summarized above, data that are now available imply that TTS is unlikely to occur in various odontocetes (and probably mysticetes as well) unless they are exposed to a sequence of several airgun pulses stronger than 190 dB re 1 μPa_{rms}. On the other hand, for the harbour seal and any species with similarly low TTS thresholds (possibly including the harbour porpoise - Lucke et al. 2007), TTS may occur upon exposure to one or more airgun pulses whose received level equals the NMFS "do not exceed" value of 190 dB re 1 μPa_{rms}. That criterion corresponds to a single-pulse SEL of 175–180 dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$ in typical conditions, whereas TTS is suspected to be possible (in harbour seals) with a cumulative SEL of ~171 dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$.

Le NMFS (1995, 2000) a conclu que les cétacés et les pinnipèdes ne devraient pas être exposés à des impulsions sonores sous-marines dont le niveau perçu dépasserait, respectivement, 180 et 190 dB re 1 μPa_{rms}. Ces niveaux ***ne*** sont ***pas*** considérés comme les niveaux au-dessus desquels un TTS se produirait. Plutôt, il s'agissait des niveaux perçus au-dessus desquels on ne pouvait être certain qu'il n'y aurait pas d'atteintes, auditives ou autres, chez les mammifères marins, de l'avis d'un groupe de bioacousticiens réunis par le NMFS à l'époque où on ne disposait pas encore de mesures de TTS chez les mammifères marins. Comme nous le résumons plus haut, les données qui sont maintenant disponibles font croire que le TTS est peu probable chez divers odontocètes (et probablement chez les mysticètes aussi), à moins qu'ils soient exposés à une séquence de plusieurs impulsions de canon à air plus fortes que 190 dB re 1 μPa_{rms}. Par contre, le phoque commun et toute autre espèce chez qui le TTS apparaît à un niveau bas (y compris peut-être le marsouin commun – Lucke *et al.*, 2007), pourraient subir un TTS s'ils étaient exposés à une ou plusieurs impulsions de canon à air dont le niveau perçu égale la valeur « à ne pas dépasser » fixée par le NMFS de 190 dB re 1 μPa_{rms}. Ce critère correspond à un SEL d'impulsion unique de 175-180 dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$ dans des conditions types, alors qu'on soupçonne que le TTS est possible (chez le phoque commun) à un SEL cumulatif de ~171 dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$.

It has been shown that most large whales and many smaller odontocetes show at least localized avoidance of ships and associated seismic operations (see Displacement and Migratory Diversion section, below). Even when avoidance is

Il a été montré que la plupart des grandes baleines et bon nombre de petits odontocètes évitent, du moins de façon localisée, les navires et leurs signaux sismiques (voir plus loin la section « Déplacement et déviation des voies migratoires »). Même si l'animal se

limited to the area within a few hundred meters of an airgun array, that should usually be sufficient to avoid the possibility of TTS based on what is currently known about thresholds for TTS onset in cetaceans. In addition, ramping up airgun arrays, which is standard operational protocol for many seismic operators, should allow cetaceans near the airguns at the time of startup to move away from the seismic source and to avoid being exposed to the full acoustic output of the airgun array. Three species of baleen whales that have been exposed to the onset of pulses from single airguns showed avoidance, specifically gray whales [Malme et al. 1984, 1986, 1988]; bowhead whales [Richardson et al. 1986, Ljungblad et al. 1988] and humpback whales [Malme et al. 1985, McCauley et al. 1998, 2000a, b]. Since startup of a single airgun is equivalent to the start of a ramp-up (=soft-start), this strongly suggests that many baleen whales will begin to move away during the initial stages of a ramp-up. Thus, most baleen whales will likely not be exposed to high levels of airgun sounds provided the ramp-up procedure is applied. Likewise, many whales close to the trackline are likely to move away before the sounds from an approaching seismic vessel become sufficiently strong for there to be any potential for TTS or other hearing impairment. Therefore, there is little potential for baleen whales or odontocetes that show avoidance of ships or airguns to be close enough to an airgun array to experience TTS. The potential of a cetacean incurring TTS may be higher in confined areas (e.g., narrow coastal fjords) where options for avoiding a seismic vessel may be limited, or in animals (some odontocetes; many pinnipeds) that show little or no avoidance response. In the event that a few individual cetaceans did incur TTS through exposure to strong airgun sounds, this is a temporary and reversible phenomenon.

contente d'éviter le secteur dans un rayon de quelques centaines de mètres de la batterie de canons à air, cela devrait suffire à éviter un TTS, d'après ce qu'on sait maintenant du seuil de perte d'audition temporaire chez les cétacés. De plus, le démarrage progressif des tirs, qui fait partie du mode opératoire normalisé de beaucoup d'opérateurs sismiques, devrait permettre aux cétacés qui sont dans le voisinage au moment du démarrage de s'éloigner de la source sismique afin d'éviter d'être exposés à toute la puissance acoustique de la batterie. Trois espèces de baleines à fanons exposées aux premières impulsions d'un canon à air isolé ont montré un comportement d'évitement, précisément les *baleines grises* (Malme *et al.*, 1984, 1986, 1988), les *baleines boréales* (Richardson *et al.*, 1986; Ljungblad *et al.*, 1988) et les *rorquals à bosse* [Malme *et al.*, 1985; McCauley *et al.*, 1998, 2000a, b). Comme le démarrage d'un seul canon à air équivaut au démarrage progressif d'une batterie, ces résultats permettent bien de penser que de nombreuses baleines à fanons vont s'éloigner dans les premiers moments d'un démarrage progressif. Ainsi, la plupart des baleines à fanons ne seront vraisemblablement pas exposées aux sons puissants des tirs de canon à air, pour autant que le mode de démarrage progressif soit appliqué. De même, de nombreuses baleines se trouvant à proximité de la trajectoire s'éloigneront probablement avant que les signaux émis d'un navire sismique qui s'approche deviennent assez forts pour provoquer un TTS ou toute autre perturbation auditive. Par conséquent, il y a peu de risques que les baleines à fanons ou les odontocètes qui tendent à éviter les navires ou les canons à air s'en approchent assez près pour subir un TTS. Le risque qu'un cétacé subisse une perte d'audition temporaire est peut-être plus élevé en zone confinée (p. ex. dans les étroits fjords côtiers), où il est difficile d'éviter un navire sismique, ou chez les animaux (certains odontocètes et de nombreux pinnipèdes) qui ne montrent pas ou montrent peu de réactions d'évitement. S'il s'avérait que quelques individus chez les cétacés subissent un TTS par suite de l'exposition à de fortes détonations de canon à air, le phénomène serait provisoire et réversible.

Permanent Threshold Shift (PTS).— When PTS occurs, there is physical damage to the sound receptors in the ear. In severe cases, there can be total or partial deafness, whereas in other cases, the animal or human has an impaired ability to hear sounds in specific frequency ranges.

There is no specific evidence that exposure to pulses of airgun sound can cause PTS in any marine mammal, even with large arrays of airguns. However, given the possibility that some mammals close to an airgun array might incur TTS, there has been further speculation about the possibility that some individuals occurring very close to airguns might incur PTS. Single or occasional occurrences of mild TTS are not indicative of permanent auditory damage in terrestrial mammals. Relationships between TTS and PTS thresholds have not been studied in marine mammals, but are assumed to be similar to those in humans and other terrestrial mammals. PTS might occur at a received sound level at least several decibels above that inducing mild TTS if the animal were exposed to strong sound pulses with rapid rise time. The specific difference between the PTS and TTS thresholds has not been measured for marine mammals exposed to any sound type. However, some reasonable assumptions can be made based on TTS and PTS data from terrestrial mammals exposed to impulses (Southall et al. 2007).

On an SEL basis, Southall et al. (2007:441-4) estimated that received levels would need to exceed the TTS threshold by at least 15 dB for there to be risk of PTS. Thus, for cetaceans they

Déplacement permanent de seuil (PTS) – La perte d'audition permanente suppose qu'il y a lésion des organes de réception du son de l'oreille. Dans les cas graves, il survient une surdité partielle ou totale; autrement, l'animal, ou l'humain, a une capacité diminuée d'entendre les sons dans certaines plages de fréquence.

Il n'y a pas de preuve particulière que l'exposition aux bruits impulsionnels de canon à air occasionne un PTS chez aucun mammifère marin, même lorsque les tirs proviennent de grosses batteries. Cela dit, étant donné la possibilité que certains mammifères à proximité d'une batterie puissent subir une perte temporaire d'audition, on s'est de nouveau intéressé à la possibilité que certains individus à proximité des canons à air subissent une perte permanente. L'apparition unique ou occasionnelle d'une légère perte d'audition temporaire n'est pas l'indication d'une lésion permanente chez les mammifères terrestres. Les relations entre les niveaux d'apparition des pertes temporaire et permanente n'ont pas été étudiées chez les mammifères marins, mais on suppose qu'ils sont analogues à ceux chez les humains et d'autres mammifères terrestres. Un PTS pourrait être provoquer par un niveau sonore perçu supérieur d'au moins plusieurs décibels au niveau provoquant un léger TTS si l'animal était exposé à de fortes impulsions sonores dont le front de montée est rapide. La différence précise entre la valeur limite du PTS et celle du TTS n'a pas été mesurée chez les mammifères marins exposés à quelque type de son que ce soit. Cependant, des hypothèses raisonnables peuvent être avancées d'après les données de TTS et de PTS chez les mammifères terrestres exposés à des impulsions (Southall *et al.*, 2007).

D'après le niveau d'exposition sonore (SEL), Southall *et al.* (2007:441-4) ont estimé qu'il faudrait que les niveaux perçus dépassent la valeur limite d'un TTS d'au moins 15 dB pour qu'il y ait risque de PTS. Ainsi, ces auteurs

estimate[2] that the PTS threshold might be a cumulative SEL (for the sequence of received pulses) of ~198 dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$[(2)]. Additional assumptions had to be made to derive a corresponding estimate for pinnipeds as there are no specific published data concerning received levels of impulse sounds associated with TTS onset in pinnipeds. Southall et al. estimate that the PTS threshold could be a cumulative SEL of ~186 dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$ in the harbour seal; for the California sea lion and northern elephant seal the PTS threshold would very likely be higher.

estiment[2] que la valeur limite de PTS chez les cétacés pourrait être un SEL cumulé (pour la séquence d'impulsions captées) de ~198 dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$. Il a fallu formuler d'autres hypothèses pour effectuer une estimation correspondante à l'égard des pinnipèdes. En effet, aucune donnée précise n'a été publiée concernant les niveaux perçus d'impulsions sonores qui provoqueraient un TTS chez les pinnipèdes. Southall *et al.* estiment que le seuil de perte d'audition permanente pourrait s'établir à un SEL de ~186 dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$ chez le phoque commun; dans le cas de l'otarie de Californie et de l'éléphant de mer boréal, cette valeur limite serait très probablement plus élevée.

Southall et al. (2007) also note that, regardless of the cumulative received energy (SEL), there is concern about the possibility of PTS if a cetacean or pinniped received one or more pulses with a very high peak pressure. Based on data from terrestrial mammals, a precautionary assumption is that impulse sounds might cause immediate PTS if the received peak pressure were 6 dB (or more) above than the TTS threshold as measured on a peak-pressure basis (Southall et al. 2007). They conclude that PTS might occur if cetaceans (as exemplified by belugas and bottlenose dolphins) and pinnipeds (as exemplified by the harbour seal) were exposed to peak pressures exceeding 230 or 218 dB re 1 µPa (peak), respectively. A peak pressure of 230 dB re 1 µPa (3.2 bar · m, 0-pk) would only be found within a few meters of the largest airguns used in most airgun arrays (Caldwell and Dragoset 2000). A peak pressure of 218 dB re 1

Southall *et al.* (2007) indiquent aussi que, quelle que soit l'énergie cumulée reçue (SEL), un PTS est à craindre si un cétacé ou un pinnipède devait subir une ou plusieurs impulsions avec une pression de crête très élevée. D'après les données sur les mammifères terrestres, on peut prudemment supposer que les impulsions sonores pourraient occasionner un PTS immédiat si la pression de crête perçue se situait 6 dB (ou plus) au-dessus du seuil de perte d'audition temporaire, mesuré d'après la pression de crête (Southall *et al.*, 2007). Ces auteurs concluent que le PTS pourrait se produire si les cétacés (par exemple les bélugas et les dauphins à gros nez) et les pinnipèdes (par exemple le phoque commun) étaient exposés à des pressions de crête dépassant 230 ou 218 dB re 1 µPa, respectivement. Une pression de crête de 230 dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$ (3,2 barres · m, 0-crête) ne se ferait ressentir qu'à quelques mètres des plus gros canons à air utilisés dans la plupart des batteries (Caldwell et Dragoset, 2000). Une pression de crête de 218 dB re 1 µPa pourrait

---

[2] This is based on the evidence from Finneran et al. (2002) that the TTS threshold in a beluga exposed to a watergun pulse is about 186 dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$ (flat weighted), or 183 dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$ after discounting the low-frequency components that are not heard well by odontocetes; and on evidence that the PTS threshold, on an SEL basis, would be at least 15 dB higher than the TTS threshold (Southall et al. 2007).

[2] D'après les indications de Finneran et al. (2002), selon lesquelles le seuil de perte d'audition temporaire chez un béluga exposé à l'impulsion d'un canon à eau est d'environ 186 dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$ (en pondération horizontale), ou 183 dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$ déduction faite des éléments de basse fréquence que n'entendent pas bien les odontocètes. L'hypothèse se fonde aussi sur des indications que le seuil de perte d'audition permanente, d'après le SEL, serait supérieur d'au moins 15 dB au seuil de perte d'audition temporaire (Southall et al., 2007).

µPa could be received somewhat farther away; to estimate that specific distance, one would need to apply a model that accurately calculates peak pressures in the near-field around an array of airguns.

Although it is unlikely that airgun operations during most seismic surveys would cause PTS in cetaceans, caution is warranted given the limited knowledge about noise-induced hearing damage in marine mammals. Commonly applied monitoring and mitigation measures, including visual monitoring, ramp-ups, and power-downs/shutdowns of the airguns when mammals are seen within the "safety radii", are expected to minimize the already-low probability of exposure of cetaceans to sounds strong enough to potentially induce PTS.

Non-Auditory Physiological Effects

DFO (2004a) determined that exposure to seismic sound under field operating conditions is unlikely to result in damage to non-auditory body tissues of marine mammals but that other sound sources operating simultaneously with seismic operations should be evaluated.

Non-auditory physiological effects or injuries that theoretically might occur in marine mammals exposed to strong underwater sound include stress, neurological effects, bubble formation, resonance, and other types of organ or tissue damage (Cox et al. 2006; Southall et al. 2007). It is possible that some marine mammal species (i.e., beaked whales) may be susceptible to injury and/or stranding when exposed to some types of strong transient sounds. However, studies examining such effects are very limited. If any such effects do occur, they would probably be limited to unusual situations when animals might be exposed at close range for unusually long periods, when the sound is strongly channeled with less-than- normal

être perçue un peu plus loin; pour estimer la distance précise, il faudrait appliquer un modèle qui calcule avec exactitude les pressions de crête dans le champ proche autour d'une batterie de canons à air.

Bien qu'il soit peu probable que des tirs sismiques de canon à air occasionnent un PTS chez les cétacés, la prudence s'impose, puisqu'on connaît mal les dommages auditifs que peut causer le bruit chez les mammifères marins. Les mesures de surveillance et d'atténuation communément appliquées, y compris la surveillance visuelle, le démarrage progressif et la diminution de puissance ou l'arrêt des canons à air lorsque des mammifères sont découverts dans le « rayon de sécurité », devraient réduire au minimum la probabilité déjà faible d'exposition des cétacés à des bruits suffisamment forts pour provoquer un PTS.

Effets physiologiques extra-auditifs

Le MPO (2004a) considère qu'il est peu probable que l'exposition à des bruits sismiques dans des conditions de prospection en mer résulte en des dommages aux tissus autres que du système auditif chez les mammifères marins, mais qu'il convient d'évaluer la présence concomitante d'autres sources sonores.

Les lésions ou effets physiologiques extra-auditifs que pourraient théoriquement subir les mammifères marins exposés à des forts bruits sous l'eau englobent les effets du stress, les effets neurologiques, la formation de bulles gazeuses, la résonance et d'autres types d'atteintes aux organes ou aux tissus (Cox *et al.*, 2006; Southall *et al.*, 2007). Il est possible que certaines espèces de mammifères marins (baleines à bec) subissent des atteintes ou s'échouent lorsque exposées à certains types de sons transitoires puissants. Or, les études de ces effets sont rares. Pour autant qu'ils se produisent, ces effets se cantonneraient probablement à des situations inhabituelles – animaux exposés de près pour une période anormalement longue, son fortement canalisé avec une perte de propagation inférieure à la normale, ou dispersion des animaux

propagation loss, or when dispersal of the animals is constrained by shorelines, shallows, etc. Airgun pulses, because of their brevity and intermittence, are less likely to trigger resonance or bubble formation than are more prolonged sounds. DFO (2004a) concluded that exposure to seismic sound under field operating conditions is unlikely to result in non-auditory physiological effects.

Until recently, it was assumed that diving marine mammals are not subject to the bends or air embolism. Jepson et al. (2003) first suggested a possible link between mid-frequency sonar activity and acute and chronic tissue damage that results from the formation in vivo of gas bubbles, based on the beaked whale stranding in the Canary Islands in 2002 during naval exercises. Fernández et al. (2005a) showed those beaked whales did indeed have gas bubble-associated lesions as well as fat embolisms. Fernández et al. (2005b) also found evidence of fat embolism in three beaked whales that stranded 100 km north of the Canaries in 2004 during naval exercises. Examinations of several other stranded species have also revealed evidence of gas and fat embolisms (e.g., Arbelo et al. 2005; Jepson et al. 2005a; Méndez et al 2005). Most of the afflicted species were deep divers. There is speculation that gas and fat embolisms may occur if cetaceans ascend unusually quickly when exposed to aversive sounds, or if sound in the environment causes the destabilization of existing bubble nuclei (Potter 2004; Arbelo et al. 2005; Fernández et al. 2005a; Jepson et al. 2005b; Cox et al. 2006). Even if gas and fat embolisms can occur during exposure to mid-frequency sonar, there is no evidence that that type of effect occurs in response to airgun sounds.

contrainte par le rivage, les hauts-fonds, etc. Les impulsions de canon à air, en raison de leur brièveté et de leur intermittence, sont moins susceptibles de provoquer la résonance ou la formation de bulles gazeuses que les sons qui se prolongent. Le MPO (2004a) a conclu que l'exposition aux bruits de l'exploration sismique est peu susceptible d'avoir des effets physiologiques extra-auditifs.

Jusqu'à récemment, on supposait que les mammifères marins plongeurs ne risquaient pas d'atteintes ostéo-arthro-articulaires (ou *bends*) ni d'embolie gazeuse. Jepson *et al.* (2003) ont été les premiers à signaler un lien possible entre l'utilisation d'un sonar à moyenne fréquence et des atteintes aiguës et chroniques des tissus provoquées par la formation *in vivo* de bulles gazeuses. Cette hypothèse a été avancée après l'échouement de baleines à bec aux îles Canaries en 2002, au cours d'exercices navals. Fernández *et al.* (2005a) ont montré que ces baleines à bec avaient subi des lésions provoquées par des bulles gazeuses ainsi que des embolies graisseuses. Fernández *et al.* (2005b) ont aussi constaté des embolies graisseuses chez trois baleines à bec qui se sont échouées à 100 km au nord des Canaries en 2004, au cours d'exercices navals. L'examen de plusieurs autres espèces dont des spécimens se sont échoués a aussi révélé la présence d'embolies gazeuses et graisseuses (voir notamment Arbelo *et al.*, 2005; Jepson *et al.*, 2005a; Méndez *et al.*, 2005). La plupart des victimes appartenaient à des espèces à plongées profondes. On suppose que les embolies se produisent si les cétacés remontent avec une rapidité inhabituelle lorsqu'ils sont exposés à des bruits aversifs ou si le bruit ambiant déstabilise des noyaux gazeux présents (Potter 2004; Arbelo *et al.*, 2005; Fernández *et al.*, 2005a; Jepson *et al.*, 2005b; Cox *et al.*, 2006). Même si des embolies gazeuses ou graisseuses peuvent survenir à l'exposition à un sonar à moyenne fréquence, rien n'indique que ce genre d'effet se produit en réaction aux émissions de canon à air.

In general, little is known about the potential for seismic survey sounds to cause non-auditory physical effects in marine mammals. Available data suggest that such effects, if they occur at all, would be limited to short distances and probably to projects involving large arrays of airguns. The available data do not allow identification of a specific exposure level (if any) above which such effects can be expected (Southall et al. 2007), or any meaningful quantitative predictions of the numbers (if any) of marine mammals that might be affected in those ways. Marine mammals that show behavioural avoidance of seismic vessels, including most baleen whales, some odontocetes, and some pinnipeds, are especially unlikely to incur non-auditory physical effects. Also, mitigation measures typically employed during seismic programs, including shut-downs of the airguns (or power-downs in jurisdictions where such partial shut-downs are applied), will reduce any such effects that might otherwise occur.

En général, on connaît peu le risque que les bruits sismiques occasionnent des effets physiques extra-auditifs chez les mammifères marins. Selon les données dont on dispose, de tels effets, pour autant qu'ils se produisent, seraient limités à des courtes distances et supposeraient probablement l'utilisation de grosses batteries de canons à air. Les données ne permettent pas de déterminer un niveau d'exposition précis (s'il en est) auquel apparaîtraient les effets (Southall et al., 2007) ni de prévoir valablement le nombre de mammifères marins qui pourraient être affectés. Les mammifères marins qui montrent un comportement d'évitement des navires sismiques, y compris la plupart des baleines à fanons, certains odontocètes et certains pinnipèdes, sont particulièrement peu susceptibles de subir des effets physiques extra-auditifs. En outre, les mesures d'atténuation habituellement employées durant les campagnes sismiques, y compris l'arrêt des canons à air (ou la diminution de puissance, dans les territoires où de telles interruptions partielles sont prévues), réduiront tous les effets qui pourraient survenir.

Direct Behavioural Effects

Effets comportementaux directs

Displacement and Migratory Diversion[3]

DFO (2004a) concluded that "exposure to seismic sound can result in displacement and/or migratory diversion in some marine mammals, but this effect is species, individual, and contextually-related. The ecological significance of such effects is unknown, but there are conditions under which [the consequences of] the worst-case scenarios could be high."

Déplacement et déviation des voies migratoires[3]

Le MPO (2004a) conclut que « l'exposition à des bruits sismiques peut résulter en un déplacement et/ou une déviation des voies migratoires chez certains mammifères marins, mais ces effets dépendent de l'espèce, de l'individu et du contexte. Le degré d'importance écologique de ces effets est inconnu, mais il existe des conditions dans lesquelles les scénarios de la pire éventualité auraient de fortes incidences ».

Reactions to sound, if any, depend on species, state of maturity, experience, current activity, reproductive state, time of day, and many other factors (Wartzok et al. 2004; Southall et al. 2007). If a marine mammal does react briefly to an underwater sound by changing its

Les réactions au bruit dépendent de l'espèce, de la maturité, de l'expérience, de l'activité en cours, du stade reproducteur, du moment de la journée et de bien d'autres facteurs (Wartzok *et al.*, 2004; Southall *et al.*, 2007). Si un mammifère marin réagit brièvement à un son sous-marin en modifiant son comportement ou

[3] *This section also considers changes in feeding behaviour.*
[3] *Cette partie porte aussi sur la modification du comportement alimentaire.*

behaviour or moving a small distance, the impacts of the change are unlikely to be significant to the individual, let alone the stock or the species as a whole (NRC 2005). However, if a sound source displaces marine mammals from an important feeding or breeding area for a prolonged period, impacts on the animals could be significant. Given the many uncertainties in predicting the quantity and types of impacts of noise on marine mammals, it is common practice to estimate how many mammals were present within a particular distance of industrial activities, or exposed to a particular level of industrial sound. That likely overestimates the numbers of marine mammals that are affected in some biologically-important manner.

en s'éloignant un peu, les impacts du changement ont peu de chances d'être importants pour cet animal, encore moins pour la population ou pour l'espèce dans son ensemble (NRC 2005). Par contre, si une source sonore déplace des mammifères marins d'une importante zone d'alimentation ou de reproduction durant une longue période, les impacts sur ces animaux pourraient être importants. Vu les nombreuses incertitudes qui entachent la prévision de la quantité et du type d'impacts du bruit sur les mammifères marins, il est de pratique courante d'estimer combien de mammifères sont présents à une distance donnée d'activités industrielles ou qui sont exposés à un niveau donné de bruit industriel. Cette façon de faire surestime probablement le nombre de mammifères marins touchés d'une façon qui soit importante sur le plan biologique.

The sound criteria used to estimate how many marine mammals might be disturbed to some biologically important degree by a seismic program are based on behavioural observations during studies of several species. However, information is lacking for many species. Detailed studies of short-term responses (or lack thereof) have been done on humpback, gray, bowhead and sperm whales, and on ringed seals. Less detailed data are available for some other species of baleen whales, small toothed whales, and sea otters.

Les critères acoustiques utilisés pour estimer comment de nombreux mammifères marins pourraient être perturbés de façon importante sur le plan biologique par un programme sismique se fondent sur les comportements observés au cours d'études de plusieurs espèces. Cependant, les informations manquent pour de nombreuses espèces. Des études détaillées des réactions (ou de l'absence de réactions) à court terme ont été faites chez le rorqual à bosse, la baleine grise, la baleine boréale et le cachalot macrocéphale , ainsi que chez le phoque annelé. On dispose de données moins détaillées pour certaines autres espèces de baleines à fanons, de petites baleines à dents et de loutres de mer.

Mysticetes.—Mysticetes tend to avoid operating airguns, but avoidance radii are quite variable. Whales often reportedly show no overt reactions to airgun pulses at distances beyond a few kilometres, even though the airgun pulses remain well above ambient noise levels out to much longer distances. However, mysticetes exposed to strong noise pulses from airguns often react by deviating from their normal migration heading and/or interrupting their feeding and moving away. Recent studies and reviews on this topic include Gordon et al.

Mysticètes – Les mysticètes évitent généralement les tirs des canons à air, mais le rayon d'évitement est assez variable. Il semble que, souvent, les baleines ne montrent pas de réactions évidentes aux impulsions de canon à air lorsqu'elles se trouvent à plus de quelques kilomètres de distance, même si ces signaux impulsionnels sont beaucoup plus puissants que le bruit ambiant sur des distances beaucoup plus longues. Cela dit, les mysticètes exposés aux fortes impulsions sonores des canons à air réagissent souvent en s'écartant de leur voie de migration habituelle et/ou en arrêtant de s'alimenter pour s'éloigner. Les

(2004), Miller et al. (2005b), Moulton and Miller (2005), Stone and Tasker (2006), Gailey et al. (2007), Yazvenko et al. (2007a,b), and Weir (2008).

Recent Studies of Mysticete Reactions: It has been suggested that South Atlantic humpback whales wintering off Brazil may be displaced or even strand upon exposure to seismic surveys (Engel et al. 2004). The evidence for this was circumstantial, subject to alternative explanations (IAGC 2004), and not consistent with results from direct studies of humpbacks exposed to seismic surveys in other areas and seasons. After allowance for data from subsequent years, there was "no observable direct correlation" between strandings and seismic surveys (IWC 2007).

Results from bowhead whale studies show that responsiveness of a given species of mysticete to seismic surveys can be quite variable depending on the activity of the whales (e.g., migrating vs. feeding). Bowhead whales migrating west across the Alaskan Beaufort Sea in autumn, in particular, are unusually responsive, with substantial avoidance occurring out to distances of 20–30 km from a medium-sized airgun source, where received sound levels were on the order of 130 dB re 1 μPa_{rms} (Miller et al. 1999; Richardson et al. 1999). However, more recent studies of bowhead whales (Miller et al. 2005b; Harris et al. 2007) corroborate earlier evidence that, during the summer feeding season, bowheads are not as sensitive to seismic sources. In summer, bowheads typically begin to show avoidance reactions at a received level of about 160–170 dB re 1 μPa_{rms} (Richardson et al. 1986; Ljungblad et al. 1988; Miller et al. 2005a). Some individual bowheads on the feeding grounds apparently begin to react at distances a few kilometres away, beyond the distance at which observers on the

études et les analyses documentaires publiées récemment sur le sujet comprennent celles de Gordon *et al.* (2004), Miller *et al.* (2005b), Moulton et Miller (2005), Stone et Tasker (2006), Gailey *et al.* (2007), Yazvenko *et al.* (2007a,b), et Weir (2008).

Études récentes des réactions des mysticètes : Il a été avancé que les rorquals à bosse de l'Atlantique Sud hivernant au large du Brésil pourraient être déplacés ou même amenés à s'échouer par l'exposition à des tirs sismiques (Engel *et al.*, 2004). Les preuves de ce comportement étaient indirectes, et d'autres explications étaient possibles (IAGC, 2004). L'hypothèse ne s'accorde pas avec les résultats d'études directes de rorquals à bosse exposés à des tirs sismiques dans d'autres secteurs et à d'autres saisons. Une fois tenu compte des données des années ultérieures, il a été conclu qu'il n'y avait « aucune corrélation directe observable » entre les échouements et les levés sismiques (IWC, 2007).

Les résultats d'études chez la baleine boréale montre que la sensibilité d'une espèce donnée de mysticètes aux tirs sismiques peut être plutôt variable, selon l'activité des baleines (p. ex. migration ou alimentation). Les baleines boréales qui migrent vers l'Ouest et traversent la partie alaskienne de la mer de Beaufort à l'automne, en particulier, montrent une sensibilité inhabituelle : elles manifestent une réaction importante d'évitement à des distances d'entre 20 et 30 km d'un dispositif de canons à air de taille moyenne, quand elles reçoivent un niveau sonore de l'ordre de 130 dB re 1 μPa_{rms} (Miller *et al.*, 1999; Richardson *et al.*, 1999). Cela dit, des études plus récentes (Miller *et al.*, 2005b; Harris *et al.*, 2007) corroborent des données antérieures selon lesquelles, durant la période estivale d'alimentation, les baleines boréales ne sont pas aussi sensibles aux sources sismiques. À l'été, ces baleines commencent habituellement à manifester une réaction d'évitement à un niveau perçu d'environ 160-170 dB re 1 μPa_{rms} (Richardson *et al.*, 1986; Ljungblad *et al.*, 1988; Miller *et al.*, 2005a). Certains sujets dans les aires d'alimentation commencent apparemment à réagir à quelques kilomètres, mais trop loin pour que les observateurs à bord du navire

ship can readily observe bowheads (Richardson et al. 1986; Citta et al. 2007), but some others allow the seismic vessel to approach close enough for observers on the ship to see the whales (Harris et al. 2007). Although feeding bowheads often remain within a few kilometres of an active seismic vessel, statistical analysis showed evidence of subtle changes in surfacing, respiration and diving cycles when feeding bowheads were exposed to lower-level pulses from distant seismic operations (Richardson et al. 1986). Feeding whales may exhibit subtle changes in behaviour in response to the sounds, but the need to feed apparently reduces the tendency to move away.

Recently published data on the responses of western Pacific gray whales to 3D seismic exploration on their feeding grounds off Russia's Sakhalin Island have considerably augmented earlier data on effects of seismic surveys on feeding gray whales. One part of this Sakhalin study involved intensive daily aerial surveys to document the distribution and abundance of the whales, and their bottom feeding activity as evident through observation of mud plumes on the water surface (Yazvenko et al. 2007a, b). The aerial surveys did not find a statistically significant effect of the seismic survey on the frequency of occurrence of mud plumes of gray whales and concluded that the 2001 seismic survey had no measurable effect on bottom feeding activity (Yazvenko et al. 2007a). Analyses revealed a localized redistribution of some gray whales within the feeding area when the seismic survey was fully operational, but the total number of gray whales observed remained stable during the seismic survey (Yazvenko et al. 2007b). Simultaneous shore-based observations determined that the relative number of western gray whales and pods recorded did not significantly differ during periods when seismic surveys were occurring compared to periods without seismic surveys and to post-seismic periods

puissent les observer (Richardson *et al.*, 1986; Citta *et al.*, 2007), mais d'autres baleines boréales laissent le navire sismique s'approcher suffisamment pour que les observateurs à bord puissent les voir (Harris *et al.*, 2007). Même si les baleines boréales en quête de nourriture demeurent souvent à quelques kilomètres d'un navire qui procède à des tirs sismiques, l'analyse statistique révèle de petites modifications dans les cycles de remontée, de respiration et de plongée quand elles étaient exposées à de faibles impulsions provenant de tirs sismiques lointains (Richardson *et al.*, 1986). Les baleines qui s'alimentent modifient parfois légèrement leur comportement en réaction aux bruits, mais le besoin de se nourrir réduit apparemment la tendance à s'éloigner.

Des données ont récemment été publiées sur les réactions de baleines grises du Pacifique occidental à une exploration sismique tridimensionnelle menée dans leurs aires d'alimentation au large de l'île russe de Sakhaline. Ces données ont considérablement enrichi les informations antérieures sur les effets des levés sismiques sur les baleines grises en quête de nourriture. L'étude de Sakhaline a compris une intense campagne de reconnaissances aériennes quotidiennes pour documenter la répartition et l'abondance des baleines ainsi que leur activité d'alimentation sur le fond par l'observation des panaches de boue à la surface de l'eau (Yazvenko *et al.*, 2007a, b). Les reconnaissances aériennes n'ont pas montré un effet statistiquement significatif des tirs sismiques sur la fréquence d'observation des panaches de boue soulevés par les baleines grises. Il en a été conclu que les levés sismiques de 2001 n'avaient pas eu d'effet mesurable sur l'activité d'alimentation sur le fond (Yazvenko *et al.*, 2007a). Les analyses ont révélé une redistribution localisée de certains individus dans l'aire d'alimentation lorsque la campagne sismique battait son plein, mais le nombre total de baleines grises observées est demeuré stable durant la campagne (Yazvenko *et al.*, 2007b). Des observations simultanées à partir du rivage ont déterminé que le nombre relatif d'individus et de groupes de baleines grises occidentales n'était pas tellement différent

(Gailey et al. 2007). However, exposure to seismic sounds did have statistically significant effects on some measures of movement behaviour. Studies of the effectiveness of monitoring and mitigation measures determined that the techniques used were successful in reducing exposure of feeding gray whales to seismic sound to levels that did not result in serious disturbance effects (Johnson et al. 2007). Acoustic measurements at the start of the seismic survey determined that reduction of the originally-planned air gun array to 14 airguns and 1,640 in^3 (Rutenko et al. 2007), combined with establishment of a 4–5 km buffer zone, were effective in ensuring that western gray whales were not exposed to received levels exceeding a pre-selected "do not exceed" level of 163 dB re 1 μPa_{rms} (Johnson et al. 2007).

durant les tirs qu'entre les périodes de tir ou après la campagne sismique (Gailey *et al.*, 2007). Cependant, l'exposition à des bruits sismiques avait des effets statistiquement significatifs sur certains aspects mesurés du comportement de déplacement. Des études sur l'efficacité des mesures de surveillance et d'atténuation ont déterminé que les techniques utilisées réussissaient à réduire l'exposition des baleines grises en quête de nourriture au bruit sismique pour ramener l'exposition à des niveaux ne provoquant pas de perturbations importantes (Johnson *et al.*, 2007). Les mesures acoustiques prises au début des levés sismiques ont montré que la réduction de la taille de la batterie prévue à l'origine, qui a été ramenée à un dispositif de 14 canons à air d'un volume de 1 640 po^3 (Rutenko *et al.*, 2007), conjuguée à l'établissement d'une zone tampon de 4 ou 5 km, a réussi à empêcher l'exposition des baleines grises occidentales à des niveaux sonores perçus dépassant un seuil fixé de 163 dB re 1 μPa_{rms} (Johnson *et al.*, 2007).

Gray whales in British Columbia exposed to seismic survey sounds with received levels up to about 170 dB re 1 μPa_{p-p} did not appear to be disturbed (Bain and Williams 2006). However, the small sample size (four sightings) and complex topography of the study area prevent any meaningful conclusions from being drawn.

En Colombie-Britannique, les baleines grises exposées à des bruits sismiques dont les niveaux perçus allaient jusqu'à environ 170 dB re 1 µPa crête à crête n'ont pas paru perturbées (Bain et Williams, 2006). Toutefois, la petitesse de l'échantillon (quatre observations) et la topographie complexe de la zone d'étude empêchent de tirer des conclusions sérieuses.

Among wintering humpback whales off Angola (n = 52 useable groups), there were no significant differences in encounter rates (sightings/hr) when a 24-airgun array (3147 in^3 or 5085 in^3) was operating vs. silent (Weir 2008). There was also no significant difference in the mean CPA (closest observed point of approach) distance of the humpback sightings when airguns were on vs. off (3050 m vs. 2700 m, respectively).

Parmi des rorquals à bosse hivernant au large de l'Angola (*n* = 52 groupes utilisables), l'utilisation d'une batterie de 24 canons à air (3 147 po^3 ou 5 085 po^3) n'a pas provoqué de différence importante dans le taux de rencontre (n^{bre} d'observations par heure) par rapport à lorsqu'il n'y avait pas de tirs (Weir, 2008). Il n'y a pas eu non plus de différence appréciable du point de rapprochement maximal (PRM) moyen observé des rorquals au moment où les canons tiraient et au moment où ils ne tiraient pas (3 050 m contre 2 700 m).

Various species of Balaenoptera (blue, sei, fin, and minke whales) have quite regularly been reported in areas of the North Atlantic ensonified by airgun pulses.

Diverses espèces de la famille des balénoptéridés (rorquals bleus, rorquals boréals, rorquals communs et petits rorquals) ont été signalées assez

Sightings by observers on seismic vessels (201 surveys) off the United Kingdom from 1997 to 2000 suggest that, at times of good sightability, numbers of rorquals seen are similar when airguns are active and inactive (Stone and Tasker 2006). Although the available data for individual species did not show significant displacement in relation to seismic surveys, when data from all baleen whales were combined, median distances (CPA) from the airguns were found to be significantly larger (~1600 m vs. 1000 m; see Figure 4 in Stone and Tasker 2006) and whales tended to head away from the vessel during seismic vs. non-seismic periods (Stone and Tasker 2006).

régulièrement dans les zones de l'Atlantique Nord insonifiées par les impulsions de canon à air. Des observateurs à bord de navires sismiques (201 levés) au large du Royaume-Uni entre 1997 et 2000 ont signalé que, en périodes de bonne visibilité, le nombre de rorquals aperçus était analogue quand les canons à air tiraient que quand ils ne tiraient pas (Stone et Tasker, 2006). Les données disponibles pour chaque espèce n'ont pas montré que les tirs provoquaient un déplacement significatif, mais une fois réunies les données sur toutes les baleines à fanons, la distance moyenne (PRM) des canons à air s'est avérée beaucoup plus grande (~1 600 m contre 1 000 m; voir la figure 4 dans Stone et Tasker, 2006), et les baleines tendaient à s'éloigner du navire quand ses canons tiraient plutôt que quand ils étaient silencieux (Stone et Tasker, 2006).

Similarly, in a study on the Scotian Slope, near the Gully submarine canyon (now a Marine Protected Area), Moulton and Miller (2005) found little difference in sighting rates (after accounting for water depth) and initial average sighting distances of balaenopterid whales when airguns were operating (mean = 1324 m) vs. silent (mean = 1303 m). However, there were indications that these whales were more likely to be moving away when seen during airgun operations. Baleen whales at the average sighting distance during airgun operations would have been exposed to sound levels (via direct path) of about 169 dB re 1 μPa_{rms} (Moulton and Miller 2005).

Pareillement, dans une étude menée sur le talus Scotian, près du canyon sous-marin du Goulet (lequel est maintenant une aire marine protégée), Moulton et Miller (2005) ont trouvé peu de différence dans les taux d'observation (compte tenu de la profondeur de l'eau) et les distances moyennes initiales d'observation des balénoptéridés entre les moments où les canons à air tiraient (moyenne = 1 324 m) et les moments où ils étaient silencieux (moyenne = 1 303 m). Cela dit, il semble que les baleines aperçues au moment des tirs étaient plus susceptibles de s'éloigner. À la distance moyenne d'observation durant les tirs, les baleines à fanons auraient été exposées à des niveaux sonores (sur une trajectoire directe) d'environ 169 dB re 1 μPa_{rms} (Moulton et Miller, 2005).

Ship-based monitoring studies of baleen whales (blue, fin, sei and minke whales) offshore Newfoundland (Orphan Basin and Laurentian Sub-basin) found no more than small differences in sighting rates and swim directions during seismic vs. non-seismic periods (Moulton et al. 2005, 2006a,b). Analyses of CPA data yielded variable results. The CPA of baleen whales sighted from the seismic vessels was, on average, significantly closer during non-seismic periods vs. seismic

Des études de surveillance des baleines à fanons (rorquals bleus, rorquals communs, rorquals boréals et petits rorquals) effectuées à partir de navires au large de Terre-Neuve (bassin Orphan et sous-bassin Laurentien) n'ont trouvé que de légères différences dans les taux d'observation et les directions où nageaient les baleines durant les tirs sismiques et durant les périodes sans tir (Moulton *et al.*, 2005, 2006a, b). Les analyses des données du point de rapprochement maximal ont livré des résultats variables. En

periods in 2004 in the Orphan Basin (means 1526 m vs. 2316 m, respectively; Moulton et al. 2005), but did not differ significantly (and were farther away during non-seismic periods) in 2005 in the Orphan Basin (973 m vs. 832 m, respectively; Moulton et al. 2006a) or in the Laurentian Sub-basin (means 1928 m vs. 1650 m; Moulton et al. 2006b). The authors of these reports, concluded that, based on observations from the seismic vessel, some mysticetes exhibited localized avoidance of seismic operations (Moulton et al. 2005,2006a).

2004, le PRM des baleines à fanons aperçues à partir des navires sismiques était, en moyenne, beaucoup plus près durant les périodes de levés sismiques qu'autrement dans le bassin Orphan (moyenne de 1 526 m contre 2 316 m; Moulton *et al.*, 2005). Par contre, aucune différence significative n'a été relevée en 2005 (et le PRM était plus éloigné durant les périodes où il n'y avait pas de levés) dans le bassin Orphan (973 m c. 832 m; Moulton *et al.*, 2006a) et dans le sous-bassin Laurentien (moyenne de 1 928 m c. 1 650 m; Moulton *et al.*, 2006b). Les auteurs des rapports ont conclu que, d'après les observations à partir du navire sismique, certains mysticètes montraient une réaction d'évitement localisé face aux tirs (Moulton *et al.*, 2005, 2006a).

Synthesis: Mysticetes tend to avoid operating airguns, but avoidance radii are quite variable. Whales are often reported to show no overt reactions to airgun pulses at distances beyond a few kilometres, even though the airgun pulses remain well above ambient noise levels out to much longer distances. However, studies done since the late 1990s of humpback and especially migrating bowhead whales show that reactions, including avoidance, sometimes extend to greater distances than documented earlier. Avoidance distances often exceed the distances at which boat-based observers can see whales, so observations from the source vessel may be biased. Studies indicate monitoring over broader areas may be needed to determine the range of potential effects of some larger seismic surveys (Miller et al. 1999; Bain and Williams 2006; Moore and Angliss 2006).

Synthèse : Les mysticètes tendent à éviter les tirs de canon à air, mais les rayons d'évitement varient pas mal. On signale souvent que les baleines ne montrent pas de réactions manifestes aux impulsions des canons à air à plus de quelques kilomètres, même si ces impulsions demeurent bien supérieures au bruit ambiant sur des distances beaucoup plus longues. Cela dit, des études réalisées depuis la fin des années 1990 chez le rorqual à bosse et surtout chez les baleines boréales migratrices révèlent que les réactions, y compris d'évitement, surviennent parfois à des distances beaucoup plus grandes que celles qui avaient été documentées auparavant. Comme les distances d'évitement dépassent souvent les distances auxquelles les observateurs à bord de bateaux peuvent apercevoir les baleines, les observations à partir du navire source peuvent être biaisées. Des études indiquent que la surveillance sur des zones plus vastes sera peut-être nécessaire pour déterminer l'éventail des effets possibles de campagnes sismiques d'envergure (Miller *et al.*, 1999; Bain et Williams, 2006; Moore et Angliss, 2006).

Some mysticetes show considerable tolerance of seismic pulses. However, when the pulses are strong enough, avoidance or other behavioural changes become evident. Because the responses

Certains mysticètes montrent une tolérance considérable à l'égard des impulsions sismiques. Toutefois, quand les impulsions sont assez fortes, une réaction d'évitement ou une autre modification du comportement se

become less obvious with diminishing received sound level, it has been difficult to determine the maximum distance (or minimum received sound level) at which reactions to seismic become evident and, hence, how many whales are affected.

manifestent. Comme les réactions deviennent moins évidentes à mesure que le niveau sonore perçu diminue, il a été difficile de déterminer la distance maximale (ou le niveau sonore perçu minimal) à laquelle les réactions aux tirs sismiques se manifestent et, donc, de déterminer combien de baleines sont touchées.

Studies of gray, bowhead, and humpback whales have determined that received levels of pulses in the 160–170 dB re 1 μPa_{rms} range seem to cause obvious avoidance behaviour in a substantial fraction of the animals exposed. In the case of migrating bowhead whales, avoidance extends to lower received sound levels and larger distances. However, in other situations, various mysticetes tolerate exposure to full-scale airgun arrays operating at closer distances, with only localized avoidance and minor changes in activities.

Des études chez la baleine grise, la baleine boréale et le rorqual à bosse ont déterminé que des niveaux perçus d'impulsions dans la plage de 160-170 dB re 1 μPa_{rms} semble occasionner un comportement d'évitement manifeste chez une bonne proportion des animaux exposés. Dans le cas des baleines boréales en migration, l'évitement se manifeste à des niveaux sonores perçus moins élevés et sur des distances plus longues. Par contre, dans d'autres situations, divers mysticètes tolèrent l'exposition à des batteries complètes de canons à air tirant à distance rapprochée, ne manifestant qu'un évitement localisé et ne modifiant que légèrement leurs activités.

Data on short-term reactions (or lack of reactions) of cetaceans to impulsive noises do not necessarily provide information about long-term effects. It is not known whether impulsive noises affect reproductive rate or distribution and habitat use in subsequent days or years. Furthermore, effects likely vary among species, locations, and times of year, and depending on past exposure to seismic sounds. In general, among mammals, mysticetes are relatively long-lived, mature late, have relatively low reproductive rates, and require high maternal investment in young. This is particularly true for bowhead and right whales. Thus, the female's ability to provide adequate care to her offspring during a prolonged period of dependency is critical to the continued recovery and long-term viability of these populations. These life history traits support the need to avoid disturbance in certain seasons or locations (Wilson et al. 2006). It has been suggested that migrating bowheads may warrant special consideration among mysticetes in terms of documented

Les données sur les réactions (ou sur l'absence de réactions) à court terme des cétacés à des bruits impulsionnels ne fournissent pas nécessairement d'informations sur les effets à long terme. On ne sait pas si les bruits impulsionnels modifient le taux de reproduction ou la répartition et l'utilisation de l'habitat dans les jours ou les années qui suivent. De plus, les effets varient probablement entre les espèces, entre les lieux et entre les moments de l'année, et dépendent de l'exposition passée à des bruits sismiques. En général, par comparaison aux autres mammifères, les mysticètes vivent assez longtemps, atteignent la maturité tard et ont un taux de reproduction relativement faible, et les jeunes exigent un grand investissement maternel. C'est particulièrement vrai chez la baleine boréale et la baleine noire de l'Atlantique Nord. Ainsi, la capacité de la femelle de prendre un soin adéquat de sa progéniture durant la longue période de dépendance de celle-ci est cruciale pour que les populations continuent de se rétablir et soient viables à long terme. Ces particularités du cycle biologique confirment le besoin d'éviter de perturber ces

deflection impacts of seismic operations, particularly during the spring when ice may constrain migration pathways (Wilson et al. 2006). However, given the remarkable abilities of bowheads to travel through heavy ice, and the impossibility of conducting conventional seismic surveys in heavy ice, this does not seem likely to be an issue.

Odontocetes.—Few studies similar to the more extensive baleen whale/seismic pulse work have been reported for odontocetes, and none similar in size and scope to the studies of humpback, bowhead, and gray whales. However, a systematic study on sperm whales has been done (see Jochens et al. 2006; Miller et al. 2006), and there is an increasing amount of information about responses of various odontocetes to seismic surveys based on monitoring studies (e.g., Smultea et al. 2004; Moulton and Miller 2005; Bain and Williams 2006; Holst et al. 2006; Stone and Tasker 2006; Weir 2008).

Seismic operators and marine mammal observers regularly see dolphins and other small odontocetes near operating airgun arrays, but in general there seems to be a tendency for most delphinids to show some limited avoidance of operating seismic vessels, on the order of 1 km or less (e.g., Moulton and Miller 2005; Holst et al. 2006; Weir 2008). Some dolphins (and Dall's porpoises) seem to be attracted to the seismic vessel and floats, and some ride the bow wave of the seismic vessel even when large arrays of airguns are active (e.g., MacLean and Koski 2005; Moulton and Miller 2005). Nonetheless, small toothed whales often tend to head away, or to maintain a somewhat greater distance from the

animaux à certaines saisons ou dans certains lieux (Wilson *et al.*, 2006). On a laissé entendre que les baleines boréales migratrices mériteraient peut-être une attention particulière parmi les mysticètes pour ce qui est de documenter l'effet de déport qu'auraient sur elles les tirs sismiques, surtout au printemps, lorsque la glace contraint le parcours migratoire (Wilson *et al.*, 2006). Cela dit, vu la capacité remarquable des baleines boréales de se déplacer dans un encombrement de glaces et vu l'impossibilité d'effectuer des levés sismiques conventionnels dans de la glace épaisse, il ne semble pas justifier de s'attarder à cet aspect.

Odontocètes – Peu d'études semblables aux vastes travaux effectués sur l'effet des impulsions sismiques sur les baleines à fanons ont été recensées à l'égard des odontocètes, et aucune de l'envergure des études effectuées chez les rorquals à bosse, les baleines boréales et les baleines grises. Cependant, une étude systématique a été réalisée chez les cachalots macrocéphales (voir Jochens *et al.*, 2006; Miller *et al.*, 2006), et il y a une quantité croissante d'informations sur les réactions de divers odontocètes aux levés sismiques d'après les études de surveillance (voir notamment Smultea *et al.*, 2004; Moulton et Miller, 2005; Bain et Williams, 2006; Holst *et al.*, 2006; Stone et Tasker, 2006; Weir, 2008).

Les opérateurs sismiques et les observateurs de mammifères marins voient régulièrement des dauphins et d'autres petits odontocètes près de batteries qui déchargent leurs canons à air, mais, en général, il semble que la plupart des delphinidés montrent une réaction restreinte d'évitement des navires sismiques en activité, dans un rayon de l'ordre de 1 km ou moins (voir notamment Moulton et Miller, 2005; Holst *et al.*, 2006; Weir, 2008). Certains dauphins (et le marsouin de Dall) paraissent attirés par les navires et les flotteurs sismiques, et certains se laissent porter dans les vagues d'étrave du navire même lorsque de grosses batteries de canons à air fonctionnent (voir notamment MacLean et Koski, 2005; Moulton et Miller, 2005). Cela dit, les petites baleines à dents

vessel, when a large array of airguns is operating than when it is silent (see Stone and Tasker 2006; Weir 2008). The beluga may be a species that (at least at times) shows long-distance avoidance of seismic vessels. Aerial surveys during seismic operations in the southeastern Beaufort Sea recorded much lower sighting rates of beluga whales within 10–20 km of an active seismic vessel. These results were consistent with the low number of beluga sightings reported by observers aboard the seismic vessel, suggesting that some belugas might be avoiding the seismic operations at distances of 10–20 km (Miller et al. 2005a). Similarly, very few belugas were observed during a recent seismic monitoring program in the southeastern Beaufort Sea (Harris et al. 2007).

During two National Science Foundation (NSF)-funded L-DEO seismic surveys in which a large 20-airgun array (~7,000 in3) was used, sighting rates of delphinids were lower and initial sighting distances were farther away from the vessel during seismic than non-seismic periods (Smultea et al. 2004; Holst et al. 2005a, 2006). The mean CPA for delphinids for both cruises was significantly farther during seismic (1043 m) than during non-seismic (151 m) periods. Surprisingly, during one of these cruises in the southeastern Caribbean, nearly all acoustic detections of odontocetes (including delphinids and sperm whales) were made during airgun operations (Smultea et al. 2004). In contrast, during the second survey (off the Yucatán Peninsula, Mexico), acoustic detection rates of odontocetes were nearly five times higher during non-seismic vs. seismic periods (Holst et al. 2005a).

s'éloignent souvent d'un navire qui décharge sa grosse batterie ou se tiennent à plus grande distance que lorsqu'il ne tire pas (voir Stone et Tasker, 2006; Weir, 2008). Le béluga est peut-être une espèce qui (du moins parfois) montre une réaction d'évitement à grande distance des navires sismiques. La reconnaissance aérienne au cours de levés sismiques dans le sud-est de la mer de Beaufort a donné des taux d'observation du béluga beaucoup plus faibles dans un rayon de 10 à 20 km d'un navire sismique en activité. Ces résultats s'accordent avec le peu d'individus aperçus par les observateurs à bord du navire, ce qui fait supposer que certains bélugas pourraient éviter les tirs sismiques à des distances de 10-20 km (Miller *et al.*, 2005a). De même, très peu de bélugas ont été observés au cours d'un récent programme de surveillance sismique dans la partie sud-est de la mer de Beaufort (Harris *et al.*, 2007).

Au cours de deux campagnes sismiques de l'observatoire terrestre Lamont-Doherty financées par la Fondation nationale des sciences des États-Unis, le fonctionnement d'une grosse batterie de 20 canons à air (~7 000 po^3) a fait baisser le taux d'observation de delphinidés et augmenter la distance d'observation initiale par rapport au navire par comparaison à lorsqu'il n'y avait pas de tirs sismiques (Smultea *et al.*, 2004; Holst *et al.*, 2005a, 2006). Le point de rapprochement maximal moyen des delphinidés au cours des deux campagnes était sensiblement plus éloigné durant les tirs sismiques (1 043 m) que durant les périodes silencieuses (151 m). Étonnamment, au cours d'une de ces campagnes dans le sud-est de la mer des Caraïbes, presque toutes les détections acoustiques d'odontocètes (y compris de delphinidés et de cachalots macrocéphales) ont été faites durant les tirs de canon à air (Smultea *et al.*, 2004). Par contre, au cours de la seconde campagne (au large de la péninsule du Yucatán, au Mexique), le taux de détection acoustique d'odontocètes a été presque cinq fois plus élevé durant les périodes silencieuses que durant les périodes de tirs (Holst *et al.*, 2005a).

An analysis of observations taken during 201 seismic surveys in UK and adjacent waters indicated that small odontocetes showed a greater range of responses to seismic surveys than did mysticetes or larger odontocetes, including significant declines in sighting rates during periods of seismic surveys (Stone and Tasker 2006). On the other hand, larger odontocetes (long-finned pilot whales, killer whales and sperm whales) showed little response to airgun activities and no reduction in sighting rates during periods of seismic surveys. Stone and Tasker (2006) suggested that avoidance behaviours exhibited by small odontocetes, and to a lesser extent by other cetaceans, appeared to be temporary.

Two seismic surveys were completed in the Orphan Basin, off Newfoundland and Labrador, in 2004 and 2005 (Moulton et al. 2005, 2006a). During both surveys, dolphin sighting rates, taking temporal variation into consideration, were higher during non-seismic periods than during seismic periods, although this difference was only statistically significant in 2004. The mean CPA of dolphins was significantly closer during non-seismic periods (652 m) vs. seismic periods (807 m) in 2005, but the difference was not statistically significant in 2004 (705 m vs. 665 m, respectively). The sighting rates of large odontocetes, primarily sperm whales, (taking temporal variation into consideration) and CPAs did not differ statistically between seismic periods vs. non-seismic periods in 2004 or 2005 in the Orphan Basin. The authors concluded that based on observations from the seismic vessel some odontocetes exhibited localized avoidance of seismic operations (Moulton et al. 2005, 2006a). Similar results for odontocetes were observed during a marine mammal monitoring program in the Laurentian Sub-basin (Moulton et al. 2006b). A major study of sperm whales in the Gulf of Mexico found that they did not show any large-scale avoidance reactions to operating airguns (Jochens et al. 2006).

L'analyse des observations faites au cours de 201 levés sismiques dans les eaux du Royaume-Uni et dans les eaux avoisinantes montre que les petits odontocètes ont eu un éventail plus large de réactions aux tirs sismiques que n'en ont eu les mysticètes ou les grands odontocètes. Notamment, le taux d'observation des petits odontocètes chutait durant les périodes de tirs (Stone et Tasker, 2006). Au contraire, les grands odontocètes (globicéphales noirs, épaulards et cachalots macrocéphales) ont peu réagi aux tirs des canons à air, et le taux d'observation n'a pas diminué en période de tirs. Stone et Tasker (2006) ont indiqué que le comportement d'évitement manifesté par les petits odontocètes, et dans une moindre mesure par d'autres cétacés, semblait temporaire.

Deux campagnes sismiques ont été réalisées dans le bassin Orphan, au large de Terre-Neuve-et-Labrador, en 2004 et en 2005 (Moulton *et al.*, 2005, 2006a). Au cours des deux campagnes, le taux d'observation des dauphins, compte tenu de la variation temporelle, a été plus élevé en périodes silencieuses qu'en périodes de tirs, bien que la différence n'ait été statistiquement significative qu'en 2004. Le PRM moyen des dauphins était sensiblement plus près en périodes silencieuses (652 m) qu'en périodes de tirs (807 m) en 2005, mais la différence n'a été statistiquement significative qu'en 2004 (705 m contre 665 m). Les taux d'observation des grands odontocètes, principalement les cachalots macrocéphales (compte tenu de la variation temporelle) et les PRM n'ont pas montré de différence statistiquement significative entre les périodes de tirs et les périodes silencieuses en 2004 ou en 2005 dans le bassin Orphan. Les auteurs concluent, d'après les observations à partir du navire sismique, que certains odontocètes ont manifesté un évitement localisé des tirs (Moulton *et al.*, 2005, 2006a). On a obtenu des résultats analogues chez les odontocètes dans le contexte d'un programme de surveillance des mammifères marins dans le sous-bassin Laurentien (Moulton *et al.*, 2006b). Une vaste étude des cachalots macrocéphales dans le golfe du Mexique a montré qu'ils ne manifestaient pas de réactions à grande

Similarly, a recent study off Angola found no significant effect of a prolonged seismic operation on sperm whale sighting rates or distances (Weir 2008).

Reactions of odontocetes to a single airgun or other small airgun source are not well documented, but do not seem to be very substantial (e.g., Stone 2003). Results from three NSF-funded L-DEO seismic surveys using small arrays (up to three GI guns totalling up to 315 in^3) were inconclusive. During surveys in the Eastern Tropical Pacific (Holst et al. 2005b) and in the Northwest Atlantic (Haley and Koski 2004), detection rates were slightly lower during seismic operations compared to non-seismic periods. However, mean CPAs were closer during seismic operations during one cruise (Holst et al. 2005b), and greater during the other cruise (Haley and Koski 2004). Interpretation of the data was confounded by the fact that survey effort and/or number of sightings during non-seismic periods during both surveys was small.

Porpoises, like delphinids, show variable reactions to seismic operations, and reactions apparently depend on species. The limited available data suggest that harbour porpoises show stronger avoidance of seismic operations than Dall's porpoises (Stone 2003; MacLean and Koski 2005; Bain and Williams 2006). In Washington State waters, the harbour porpoise - despite being considered a high-frequency specialist - appeared to be the species affected by the lowest received level of sound (<145 dB re 1 μPa_{rms} at a distance > 70 km) (Bain and Williams 2006). In contrast, Dall's porpoises seem relatively tolerant of airgun operations (MacLean and Koski 2005; Bain and Williams 2006). This

échelle d'évitement des tirs de canon à air (Jochens *et al.*, 2006). De même, une étude récente au large de l'Angola n'a pas révélé qu'une campagne sismique prolongée avait eu d'effet important sur le taux d'observation ou la distance des cachalots macrocéphales (Weir, 2008).

Les réactions d'odontocètes à un seul canon à air ou à un autre petit dispositif de tirs à air comprimé ne sont pas bien documentées, mais elles semblent considérables (voir notamment Stone, 2003). Les résultats de trois levés sismiques de l'observatoire terrestre Lamont-Doherty financés par la Fondation nationale des sciences n'ont pas été concluants; on utilisait de petites batteries (jusqu'à trois canons GI pour un volume total d'au plus 315 po^3). Au cours de levés dans la partie est de l'océan Pacifique tropical (Holst *et al.*, 2005b) et dans le nord-ouest de l'Atlantique (Haley et Koski, 2004), les taux de détection étaient légèrement inférieurs durant les tirs sismiques que durant les périodes silencieuses. Toutefois, les PRM moyens ont été plus près durant les tirs au cours d'une campagne (Holst *et al.*, 2005b), et plus éloignés durant l'autre campagne (Haley et Koski, 2004). Le fait qu'il s'agissait de petites campagnes et que le nombre d'observations en périodes silencieuses a été faible dans les deux cas a constitué un facteur de confusion dans l'interprétation des données.

Les marsouins, comme les delphinidés, manifestent face aux tirs sismiques des réactions variées, qui dépendent apparemment de l'espèce. D'après le peu de données disponibles, il semble que le marsouin commun montrent une réaction d'évitement plus forte que celle du marsouin de Dall (Stone, 2003; MacLean et Koski, 2005; Bain et Williams, 2006). Dans les eaux de l'État de Washington, le marsouin commun – pourtant considéré comme un amateur de hautes fréquences – semble être une espèce touchée par le niveau sonore perçu le plus bas (< 145 dB re 1 μPa_{rms} à une distance de > 70 km) (Bain et Williams, 2006). Par contre, le marsouin de Dall paraît plutôt tolérant aux tirs des canons à air (MacLean et Koski, 2005; Bain et Williams, 2006). Cette différence

apparent difference in responsiveness of these two porpoise species is consistent with their relative responsiveness to boat traffic and some other acoustic sources (Richardson et al. 1995; Southall et al. 2007).

There are no specific data on the behavioural reactions of beaked whales to seismic surveys. Most beaked whales tend to avoid approaching vessels of other types (e.g., Würsig et al. 1998; see also Sorensen et al. 1984). They may also dive for an extended period when approached by a vessel (e.g., Kasuya 1986). It is likely that these beaked whales would normally show strong avoidance of an approaching seismic vessel, but this has not been documented explicitly. However, northern bottlenose whales sometimes are quite tolerant of slow-moving vessels (see Reeves et al. 1993; Hooker et al. 2001). However, those vessels were not emitting airgun pulses. Northern bottlenose whales have been observed from seismic vessels during periods of airgun operations (Moulton et al. 2006a,b).

Conclusion: Dolphins and porpoises are often seen by observers on active seismic vessels, occasionally at close distances. However, some studies show localized avoidance. Belugas summering in the Beaufort Sea tended to avoid waters out to 10–20 km from an operating seismic vessel (Miller et al. 2005b). Recent studies show little evidence of avoidance reactions by sperm whales to airgun pulses, contrary to earlier indications.

Odontocete reactions to large arrays of airguns are variable. For delphinids and Dall's porpoises,significant disturbance seems to be confined to a smaller radius than has been observed for the more responsive of the mysticetes, belugas, and harbour porpoises. For delphinids and Dall's porpoises (and also pinnipeds), strong reactions seem to be largely

apparente de sensibilité entre les deux espèces de marsouin s'accorde avec leur sensibilité relative à la circulation des navires et à d'autres sources sonores (Richardson *et al.*, 1995; Southall *et al.*, 2007).

Il n'y a pas de données précises sur le comportement des baleines à bec en réaction à des levés sismiques. La plupart des baleines à bec tendent à éviter tout navire qui s'approche (voir notamment Würsig *et al.*, 1998; Sorensen *et al.*, 1984). Elles peuvent aussi plonger pour un long moment lorsqu'un navire s'approche (voir notamment Kasuya, 1986). Il est probable que ces baleines manifesteraient normalement une forte réaction d'évitement à un navire sismique s'approchant, mais le fait n'a pas été explicitement documenté. Cela dit, les baleines à bec communes sont parfois très tolérantes des navires qui avancent lentement (voir Reeves *et al.*, 1993; Hooker *et al.*, 2001). Dans les cas relevés, cependant, les navires n'émettaient pas d'impulsions de canon à air. Les baleines à bec communes ont été observées à partir de navires sismiques durant des tirs (Moulton *et al.*, 2006a,b).

Conclusion : Des dauphins et des marsouins sont souvent aperçus par des observateurs à bord de navires sismiques en activité, à l'occasion de près. Toutefois, certaines études révèlent un évitement localisé. Les bélugas passant l'été dans la mer de Beaufort tendent à éviter les parages (10-20 km) d'un navire sismique en activité (Miller *et al.*, 2005b). Des études récentes ont trouvé peu d'indications d'une réaction d'évitement chez les cachalots macrocéphales face aux impulsions de canon à air, contrairement à ce qui avait été indiqué antérieurement.

Les réactions des odontocètes à de grosses batteries de canons à air varient. Chez les delphinidés et le marsouin de Dall, les perturbations importantes semblent confinées à un rayon plus court que celui observé chez les mysticètes, bélugas et marsouins communs parmi les plus sensibles. Chez les delphinidés et le marsouin de Dall (ainsi que chez les pinnipèdes), les réactions fortes se limitent

limited to the area within 1 or 2 km of airgun arrays. Given the available data on typical received levels of airgun array sound at those distances, a ≥170 dB re 1 μPa_{rms} disturbance criterion is probably more appropriate for delphinids, Dall's porpoises (and pinnipeds) than the ≥160 dB criterion that is often used. The 160 dB criterion originated from studies of gray, bowhead and humpback whales, and its blanket application to odontocetes is not well justified.

Pinnipeds.—Monitoring results from the Canadian Beaufort Sea during 2001-2002 were variable (Miller et al. 2005b). During 2001, sighting rates of seals (mostly ringed seals) were similar during all seismic states, including periods without airgun operations. However, seals were seen closer to the vessel (on average) during non-seismic than during seismic periods. In contrast, during 2002, sighting rates of seals were higher during non-seismic periods than seismic operations, and seals tended to be seen farther from the vessel during non-seismic compared to seismic activity (a marginally significant result). The combined data for both years showed that sighting rates were higher during non-seismic periods compared to seismic periods, and that sighting distances were similar during both seismic states. Miller et al. (2005b) concluded that seals showed very limited avoidance to the operating airgun array. That conclusion was consistent with results from six seasons of seismic monitoring in the Alaskan Beaufort Sea (Harris et al. 2001; Moulton and Lawson 2002).

In summary, visual monitoring from seismic vessels has shown only slight (if any) avoidance of airguns by pinnipeds, and only slight (if any) changes in behaviour. This, and other studies, indicate that pinnipeds frequently do not avoid the area within a few hundred meters of an operating airgun array. This indicates that most pinnipeds are

largement à une distance de 1 à 2 km des batteries. Selon les données disponibles sur les niveaux sonores habituellement perçus des canons à air à ces distances, un critère de perturbation de ≥ 170 dB re 1 μPa_{rms} convient probablement mieux à l'égard des delphinidés et du marsouin de Dall (ainsi que des pinnipèdes) que le critère de ≥ 160 dB qui est souvent utilisé. Le critère de 160 dB provient d'études chez la baleine grise, la baleine boréale et le rorqual à bosse, et son application généralisée à tous les odontocètes se justifie mal.

Pinnipèdes – Les résultats de surveillance dans la partie canadienne de la mer de Beaufort en 2001-2002 ont varié (Miller *et al.*, 2005b). En 2001, les taux d'observation des phoques (surtout du phoque annelé) ont été similaires à toutes les étapes de la campagne sismique, même en périodes silencieuses. Cependant, les phoques s'approchaient davantage du navire, en moyenne, durant les périodes silencieuses que durant les périodes de tirs. En revanche, en 2002, les taux d'observation des phoques ont été plus élevés durant les périodes silencieuses que durant les tirs, et les phoques étaient vus en général plus loin du navire quand il n'y avait pas de tirs (résultat marginalement significatif). La combinaison des données des deux années a montré que les taux d'observation étaient plus élevés en périodes silencieuses, et que les distances d'observation étaient analogues, avec ou sans tir. Miller *et al.* (2005b) ont conclu que les phoques manifestaient une réaction très restreinte d'évitement à l'égard des batteries de canons à air en activité. Cette conclusion s'accordait avec les résultats de six saisons de surveillance sismique dans la partie alaskienne de la mer de Beaufort (Harris *et al.*, 2001; Moulton et Lawson, 2002).

En résumé, la surveillance visuelle à partir de navires sismiques a montré une réaction d'évitement légère (ou nulle) des canons à air de la part des pinnipèdes et seulement une modification légère (ou aucune modification) du comportement. Ce résultat, et ceux d'autres études, indiquent que les pinnipèdes souvent n'évitent pas la zone de quelques centaines de mètres autour d'une batterie de canons à air qui

apparently not much disturbed even by the rather close approach of an operating seismic vessel. On the other hand, this lack of avoidance is a concern because it suggests that one cannot rely on pinnipeds to move away before received levels of airgun sound approach those that may cause TTS (and perhaps even PTS in certain cases).

Fissipeds.—No information on sea otter and polar response to seismic sounds has become available since 2004. From past studies, it appears that sea otters may be less responsive to marine seismic pulses than other marine mammals (Riedman 1983, 1984). Also, sea otters spend a great deal of time at the surface feeding and grooming. While at the surface, the potential noise exposure of sea otters would be much reduced by the pressure release effect at the surface.

Airgun effects on polar bears have not been studied. However, polar bears on the ice would be unaffected by underwater sound. Sound levels received by polar bears in the water would be attenuated because polar bears generally do not dive much below the surface and received levels of airgun sounds are reduced near the surface because of the pressure release effect at the water's surface (Greene and Richardson 1988; Richardson et al. 1995).

Changes in Dive and Respiratory Patterns

DFO (2004a) concluded that "exposure to seismic sound can result in changes in dive and respiratory patterns of some marine mammals, but this effect is expected to vary with species, individual, and context. The ecological significance of such effects is unknown, but there are conditions under which [the consequences of] the worst-case scenarios could be high."

tire. La plupart des pinnipèdes ne sembleraient donc pas très perturbés même par la présence plutôt rapprochée d'un navire sismique en activité. Cette absence de réaction d'évitement est préoccupante, car elle signifie qu'on ne peut compter que les pinnipèdes s'éloigneront avant que le niveau perçu de bruit sismique approche le niveau qui pourrait occasionner un TTS (voir dans certains cas un PTS).

Fissipèdes – On ne dispose d'aucune information sur la réaction à des bruits sismiques de la loutre de mer et de l'ours polaire depuis 2004. D'après les études passées, il semble que la loutre de mer soit moins sensible aux impulsions de la sismique marine que d'autres mammifères marins (Riedman, 1983, 1984). De plus, la loutre de mer passe beaucoup de temps à la surface pour s'alimenter et faire sa toilette. Lorsqu'elle se trouve à la surface, l'exposition éventuelle est très réduite en raison de la détente de pression.

L'effet des canons à air sur l'ours blanc n'a pas été étudié. Toutefois, quand il se trouve sur la glace, l'ours ne serait pas affecté par le bruit sous-marin. Le niveau sonore perçu dans l'eau serait atténué, parce que l'ours blanc, en général, ne plonge pas très loin de la surface, et les niveaux perçus des sons provenant des canons à air sont réduits près de la surface, en raison de la détente de pression à la surface de l'eau (Greene et Richardson, 1988; Richardson *et al.*, 1995).

Changements dans les régimes de plongée et de respiration

Le MPO (2004a) conclut que « l'exposition à des bruits sismiques peut résulter en des changements dans les régimes de plongée et de respiration chez certains mammifères marins, mais on s'attend à ce que ces effets varient selon l'espèce, l'individu et le contexte. Le degré d'importance écologique de ces effets est inconnu, mais il existe des conditions dans lesquelles le pire des scénarios pourrait avoir de fortes incidences ».

Recent results from the sperm whale tagging studies in the northern Gulf of Mexico have shown that, among eight tagged sperm whales exposed to airgun sounds, neither gross diving behaviour nor direction of movement changed for any of the individuals exposed to onset of seismic airgun sounds. These observations were obtained at the onset of gradual ramp-up at ranges of 7–13 km or during full-power exposures 1.5–12.8 km from the airguns (Jochens et al. 2006). However, some changes in foraging behaviour were observed that suggested avoidance of deep dives near operating airguns. Foraging behaviour was disrupted by airguns at exposure levels ranging from <130 to 162 dB re 1 μPa_{p-p} at distances of roughly 1–12 km from the sound source. The sample size was small. These results raise questions about the efficacy of ramp-up as a mitigation strategy for sperm whales, i.e., whether they swim away from oncoming seismic vessels. However, the observations may not be relevant to sperm whales in habitats where there has been less seismic exploration than the Gulf of Mexico (Jochens et al. 2006). Sperm whales in the Gulf of Mexico may be habituated to airgun pulses.

Les résultats récents d'une étude par marquage menée dans le nord du golfe du Mexique et portant sur le cachalot macrocéphale montrent que, sur huit cachalots macrocéphales marqués qui ont été exposés aux impulsions de canon à air, aucun des individus exposés aux impulsions de départ n'a modifié son comportement général de plongée ou la direction dans laquelle il se mouvait. Ces observations ont été faites au début du démarrage progressif des canons à des distances de 7 à 13 km, ou pendant l'exposition à la pleine puissance des canons, à des distances de 1,5 à 12,8 km (Jochens *et al.*, 2006). On a toutefois observé certains changements dans leur quête de nourriture, les cachalots semblant éviter de plonger en profondeur à proximité des canons à air en activité. La quête de nourriture a été perturbée à des niveaux d'exposition allant de moins de 130 à 162 dB re 1 µPa crête à crête, à des distances d'environ 1 à 12 km de la source sonore. La taille de l'échantillon était petite. Ces résultats mettent en question l'efficacité de la méthode du démarrage progressif (élévation graduelle du niveau de bruit) comme mesure d'atténuation pour les cachalots macrocéphales, c'est-à-dire qu'on ne sait pas si ces cachalots s'éloignent à l'approche des navires sismiques. Toutefois, les observations qui précèdent pourraient ne pas s'appliquer aux cachalots macrocéphales dont l'habitat fait moins souvent l'objet de prospection sismique que le golfe du Mexique (Jochens *et al.*, 2006). Il est possible que les cachalots macrocéphales du golfe se soient habitués aux impulsions des canons à air.

Shore-based observations of western gray whales on their feeding grounds indicated that most measures of surfacing, respiration and diving behaviour were not significantly correlated with seismic survey variables (Gailey et al. 2007). After accounting for effects of temporal and environmental covariates, they found no correlation between seismic variables and the mean number of whale exhalations per minute at the surface, mean time at the surface, and mean number of exhalations per minute during a

Des observations, à partir de l'île Sakhaline, de baleines grises dans leur aire d'alimentation ont révélé qu'il n'y avait pas de corrélation significative de la plupart des mesures concernant leurs comportements de nage à la surface, de respiration et de plongée avec les variables des levés sismiques (Gailey *et al.*, 2007). Après avoir considéré les effets des covariables temporelles et environnementales, aucune corrélation n'a été observée entre les variables sismiques et le nombre moyen d'expirations par minute à la surface, la durée moyenne où les baleines demeuraient à la

whales' surface-to-dive cycle. In contrast, at higher received sound energy exposure levels, whales were observed to stay under water longer between respirations (a result contrary to some previous data from gray and bowhead whales).

surface et le nombre moyen d'expirations par minute pendant leur cycle surface-plongée. Par contre, lorsqu'elles étaient exposées à des niveaux d'énergie acoustique plus élevés, on a observé que les baleines restaient plus longtemps sous l'eau entre les respirations (un résultat contraire à certaines données antérieures sur les baleines grises et sur les baleines boréales).

Changes in Social Behaviour

DFO (2004a) concluded that *"it is unknown if exposure to seismic sound can result in changes in marine mammal social behaviour but if it were to occur there are conditions under which the worst-case consequences of such changes could be highly significant."*

Previous studies described in this review and past reviews mainly relate to the effects of seismic surveys on marine mammal distribution, movements, and avoidance (or lack thereof) during feeding, migration, and (in some cases) unspecified activities. There are no published studies aimed at examining the specific impacts of seismic surveys on social behaviours such as mating, cooperative feeding, or aggressive interactions.

Changements dans le comportement social

Le MPO (2004a) conclut que *« on ne sait pas si l'exposition à des bruits sismiques peut résulter en des changements dans le comportement social des mammifères marins, mais s'ils se produisaient, il existe des conditions dans lesquelles le pire des scénarios pourrait avoir des conséquences très importantes ».*

Les études décrites dans notre évaluation et dans des évaluations antérieures concernent surtout les effets des levés sismiques sur la répartition des mammifères marins, leurs mouvements et leur réaction ou absence de réaction d'évitement au cours de la recherche de nourriture, la migration et, dans certains cas, d'autres activités non précisées. Aucune étude n'a été publiée qui cible les effets précis des levés sismiques sur les comportements sociaux des mammifères marins, comme l'accouplement, l'alimentation en coopération ou les interactions agressives.

Changes in Vocalization Patterns

DFO (2004a) concluded that *"it is known that exposure to seismic sound can result in changes in marine mammal vocal behaviour, and when it occurs, there are conditions under which the worst-case consequences could be highly significant."*

Several studies demonstrate that various marine mammals adapt the source levels or frequencies of their calls in response to the levels and frequencies of background sounds (reviewed in Tyack 2008). However, the available information pertains mainly to continuous or prolonged sounds, not to low-duty-cycle

Changements des vocalisations

Le MPO (2004a) conclut que *« on sait que l'exposition à des bruits sismiques peut résulter en des changements dans le comportement de vocalisation chez les mammifères marins et, lorsque cela se produit, il existe des conditions dans lesquelles le pire des scénarios pourrait avoir des conséquences très importantes ».*

Plusieurs études montrent que divers mammifères marins adaptent le niveau d'émission ou la fréquence de leurs appels en fonction des niveaux et des fréquences des sons ambiants (analyse de Tyack, 2008). Toutefois, les renseignements disponibles à ce sujet touchent principalement les sons continus ou prolongés et non les sons à petit facteur de

sounds such as seismic pulses.

Some baleen and toothed whales are known to continue calling in the presence of seismic operations and often can be heard between the seismic pulses (e.g., Richardson et al. 1986; McDonald et al. 1995; Greene et al. 1999a,b; Nieukirk et al. 2004; Smultea et al. 2004). Although there has been one report that sperm whales ceased calling when exposed to pulses from a very distant seismic ship (Bowles et al. 1994), a more recent study reports that sperm whales off northern Norway continued calling in the presence of seismic pulses (Madsen et al. 2002). That has also been shown during recent work in the Gulf of Mexico (Tyack et al. 2003; Smultea et al. 2004; Jochens et al. 2006). Dolphins and porpoises commonly are heard calling while airguns are operating (e.g., Gordon et al. 2004; Smultea et al. 2004; Holst et al. 2005a,b). There is one recent summary report indicating that calling fin whales distributed in one part of the North Atlantic went silent for an extended period starting soon after the onset of a seismic survey in the area (Clark and Gagnon 2006). It is not clear from that preliminary paper whether the whales ceased calling as a behavioural response to seismic noise or because of masking (see below).

An early study in the Canadian Beaufort Sea showed that bowhead whales continue to call in the presence of airgun sounds, with the types of calls being unchanged (Richardson et al. 1986). A subsequent study in the Alaskan Beaufort Sea provided evidence of a reduction in bowhead calling (or at least call detection rate) when airgun sounds were present (Greene et al. 1999a,b). However, it is uncertain whether that change was a function of altered calling rate upon receipt of airgun sounds, or altered

forme, comme les impulsions sismiques.

On sait que certaines espèces de baleines à fanons et de baleines à dents continuent leurs appels au cours d'opérations sismiques et elles se font souvent entendre entre deux impulsions sismiques (voir notamment, Richardson *et al.*, 1986; McDonald *et al.*, 1995; Greene *et al.*, 1999a, b; Nieukirk *et al.*, 2004; Smultea *et al.*, 2004). Bien qu'on ait signalé une fois que des cachalots macrocéphales avaient cessé leurs appels alors qu'ils étaient exposés à des impulsions provenant d'un navire sismique très éloigné (Bowles *et al.*, 1994), une étude plus récente indique que des cachalots macrocéphales observés au nord de la Norvège ont continué à émettre leurs appels malgré des impulsions sismiques (Madsen *et al.*, 2002). Cette observation a aussi été faite lors d'études récentes menées dans le golfe du Mexique (Tyack *et al.*, 2003; Smultea *et al.*, 2004; Jochens *et al.*, 2006). Des dauphins et des marsouins sont fréquemment entendus pendant que des canons à air sont déchargés (voir notamment, Gordon *et al.*, 2004; Smultea *et al.*, 2004; Holst *et al.*, 2005a, b). Un rapport sommaire récent indique que les appels de rorquals communs répartis dans une partie de l'Atlantique Nord ont cessé pendant une longue période, peu après le début d'un levé sismique dans ce secteur (Clark et Gagnon, 2006). Ce rapport préliminaire ne permet pas d'établir clairement si le silence des rorquals constitue une réponse comportementale aux bruits sismiques ou si leurs appels ont été masqués (voir plus bas).

Une étude ancienne dans la partie canadienne de la mer de Beaufort a montré que les baleines boréales continuent leurs appels en présence des sons produits par les canons à air, sans changer les types d'appel (Richardson *et al.*, 1986). Une étude ultérieure dans la partie alaskienne de la mer de Beaufort a permis de prouver la diminution du nombre d'appels des baleines boréales (du moins la diminution du taux de détection des appels) en présence des signaux émis par les canons à air (Greene *et al.*, 1999a,b). Toutefois, il n'est pas certain que le changement ait été lié à une modification

distribution of the whales (which was independently demonstrated to occur - Miller et al. 1999; Richardson et al. 1999).

A series of seismic surveys in the Chukchi and Beaufort seas from July to November 2006 examined the distribution and relative levels of vocal activity of bowhead and beluga whales as determined via passive acoustic detection (Funk et al. 2007). (Similar follow-on work, not yet widely reported, was done in 2007.) The results from 2006 indicated that there was insufficient evidence to evaluate whether or not the distribution and relative levels of vocal activity of bowhead and beluga whales were affected by the airgun sounds. The authors warn that until much more is known about the variations in the acoustic behaviours of bowhead whales and the natural factors influencing calling behaviour, relationships between bowhead acoustic behaviour and airgun activity will remain anecdotal and speculative. There are indications that various features of bowhead calling behaviour are correlated with a variety of natural environmental variables, and possibly with variable levels of industrial sound (Blackwell et al. 2008).

Functional Consequences of Physical and Behavioural Effects

Reduced Communication and Echolocation Efficiency

DFO (2004a) concluded that "*it is unknown if exposure to seismic sound can result in reduced communication or echolocation efficiency in marine mammals.*"

du taux d'appel causée par le captage des sons produits par les canons à air ou à une modification dans la répartition des baleines (modification qui a été constatée par ailleurs [Miller *et al.*, 1999; Richardson *et al.*, 1999]).

Un ensemble de levés sismiques effectués de juillet à novembre 2006 dans la mer des Tchouktches et dans la mer de Beaufort ont permis d'étudier la répartition de même que les niveaux relatifs d'activité vocale des baleines boréales et des bélugas par détection acoustique passive (Funk *et al.*, 2007). Une étude ultérieure similaire, dont les résultats ne sont pas encore tous connus, a été menée en 2007. Les résultats de l'étude de 2006 indiquent que les preuves étaient insuffisantes pour évaluer si les émissions des canons à air jouaient ou non sur les niveaux relatifs d'activité vocale et sur la répartition des baleines boréales et des bélugas. Les auteurs ont précisé que, tant qu'une quantité beaucoup plus importante de renseignements n'aura pas été recueillie sur les variations du comportement acoustique des baleines boréales et sur les facteurs naturels qui influent sur les vocalisations, les liens entre le comportement d'appel des baleines boréales et les émissions des canons à air demeureront anecdotiques et basés sur des suppositions. Certains indices donnent à penser que diverses caractéristiques du comportement d'appel des baleines boréales sont corrélées avec un éventail de variables environnementales naturelles et, possiblement, avec des niveaux variables de sons d'origine industrielle (Blackwell *et al.*, 2008).

Conséquences fonctionnelles des effets physiques et comportementaux

Efficacité réduite de la communication et de l'écholocation

Le MPO (2004a) conclut que « *on ne sait pas si l'exposition à des bruits sismiques peut résulter en une réduction de l'efficacité d'écholocation chez les mammifères marins* ».

Masking effects of pulsed sounds on marine mammal calls and other natural sounds are expected to be limited, although there are very few specific data on this. Because of the intermittent nature and low duty cycle of seismic pulses, animals can emit and receive sounds in the relatively quiet intervals between pulses. Most studies that have examined the potential adverse effects of masking caused by anthropogenic underwater sounds have involved exposure of marine mammals to sounds that are often continuous or nearly continuous, and are not airgun pulses. This section deals only with airgun and similar pulsed sounds.

On présume que les effets de masquage des impulsions sonores sur les appels des mammifères marins et sur les autres sons naturels sont limités, bien qu'il y ait très peu de données précises à ce sujet. La nature intermittente et le petit facteur de forme des impulsions sismiques font que les animaux peuvent émettre et recevoir des sons pendant l'intervalle de silence relatif entre les impulsions. La plupart des études qui ont porté sur les effets potentiellement néfastes du masquage causé par les bruits sous-marins d'origine humaine traitaient aussi de l'exposition des mammifères marins aux sons qui sont souvent continus, ou presque, et qui ne sont pas des impulsions produites par des canons à air. Cette section ne traitera que des sons qui proviennent des canons à air et des sons impulsionnels semblables.

An anthropogenic sound source will mask (i.e., reduce) the effective communication or echolocation distance of a marine mammal only if overlaps the sound signal in time and frequency. If little or no overlap occurs between the sound and the frequencies used, communication and echolocation are not expected to be disrupted or masked. As reviewed in Appendix A, most energy in sound pulses emitted by seismic airgun arrays is at low frequencies, with strongest spectrum levels below 200 Hz,considerably lower spectrum levels above 1,000 Hz, and smaller amounts of energy emitted up to ~150kHz. These low frequencies are mainly used by mysticetes, but generally not by odontocetes, pinnipeds, or fissipeds (see Appendix B). Strong anthropogenic sounds are presumed not to interfere with signalling of marine mammals that are using frequencies outside the range of the anthropogenic sounds. Furthermore, the discontinuous nature of seismic pulses makes significant masking effects unlikely even for mysticetes.[4] Studies demonstrating that cetacean species continue to call in the

Une source sonore d'origine humaine aura un effet de masque, c'est-à-dire réduira la distance effective de communication ou d'écholocation d'un mammifère marin seulement si les sons émis chevauchent le signal vocal de l'animal en durée et en fréquence. Si le chevauchement est très léger ou nul, la communication et l'écholocation ne devraient pas être perturbées ou masquées. Comme le montre l'analyse présentée à l'annexe A, la majeure partie de l'énergie produite par les impulsions sonores des batteries de canons à air sismiques est de basse fréquence; les niveaux spectraux étant pour l'essentiel sous les 200 Hz, une part considérablement moindre au-dessus de 1 000 Hz, et de petites quantités de l'énergie émises jusqu'à ~ 150 kHz. Ces basses fréquences sont principalement utilisées par les mysticètes, et généralement pas par les odontocètes, les pinnipèdes et les fissipèdes (voir l'annexe B). On présume que les sons forts d'origine humaine ne devraient pas gêner les signaux des mammifères marins qui utilisent des fréquences qui se situent hors de la gamme de fréquence des sons d'origine humaine. De plus, les impulsions sismiques étant intermittentes, il est peu probable qu'elles produisent un effet de masquage significatif,

presence of seismic operations are described in the previous section, Changes in Vocalization Patterns.

même pour les mysticètes.[4] Les études qui montrent que les cétacés continuent leurs appels au cours d'opérations de prospection sismique sont présentées plus haut à la section « Changements des vocalisations ».

There is no information on masking of pinniped calls by pulsed sounds like airgun signals, but any such masking is expected to be minimal due mainly to the low duty cycle of airgun pulses.

Aucune donnée n'existe sur le masquage des appels des pinnipèdes par les impulsions sonores telles que les signaux sismiques, mais on présume que ce masquage devrait être minime, principalement à cause du petit facteur de forme des impulsions des canons à air.

Masking effects of seismic pulses are expected to be negligible in the case of polar bears and sea otters due to their use of in-air rather than underwater calls.

Les effets de masquage des impulsions sismiques devraient être négligeables pour les ours blancs et les loutres de mer, puisque leurs appels se font hors de l'eau.

Hampered Passive Acoustic Detection of Prey and Predators

Capacité diminuée de détection acoustique passive des proies et des prédateurs

DFO (2004a) concluded that "*it is unknown whether exposure to seismic sound can hamper the passive acoustic detection of prey by marine mammals. DFO also concluded that it is unknown whether exposure to seismic sound could increase the vulnerability of marine mammals to predators.*"

Le MPO (2004a) conclut que « *on ne sait pas si l'exposition à des bruits sismiques pourrait diminuer la capacité de détection acoustique passive de proies chez les mammifères marins* ». *Le MPO conclut aussi que « on ne sait pas si l'exposition à des bruits sismiques pourrait accroître la vulnérabilité des mammifères marins à leurs prédateurs* ».

No studies, either recent or older, have specifically examined the potential effects of seismic sound on the abilities of marine mammals to detect prey and/or predators. It is also unknown which, if any, species of marine mammals would use passive acoustic detection of prey as an important feeding strategy, with perhaps the exception of transient killer whales (e.g., Barrett-Lenard et al. 1996; Deecke et al. 2005). In general, masking by airgun signals is unlikely to have much effect on passive acoustic detection of prey. The

Aucune étude, récente ou non, n'a analysé de façon précise les effets potentiels des bruits sismiques sur la capacité des mammifères marins de détecter les proies et les prédateurs. On ignore aussi quelles espèces de mammifères marins, s'il en existe, auraient recours à la détection acoustique passive des proies comme grande stratégie d'alimentation, à l'exception, peut-être, des épaulards migrateurs (voir notamment Barrett-Lenard *et al.*, 1996; Deecke *et al.*, 2005). De manière générale, le masquage produit par les impulsions des canons à air risque peu d'avoir

[4] *Near the source, the predominant part of a seismic pulse is about 10–20 ms in duration and the interpulse interval is typically 10-12 s, resulting in a low duty cycle (<5%). Other sounds are audible in the gaps except perhaps in the unusual situation where there is strong reverberation of sound that persists for much of the gap between received pulses.*

[4] *Près de la source sonore, la majeure partie d'une impulsion sismique dure environ 10 à 20 ms, et l'intervalle entre les impulsions dure habituellement de 10 à 12 s, ce qui se traduit par un petit facteur de forme (< 5 %). D'autres sons sont audibles pendant les intervalles, sauf, peut-être, dans des cas exceptionnels où une forte réverbération du son persiste pendant presque tout l'intervalle entre les impulsions captées.*

low duty cycle of the pulses means that audibility of other sounds will be little affected during the intervals between pulses.

For similar reasons, vulnerability to predators is unlikely to be much affected through masking by airgun signals. However, ability to detect predators could, at least in theory, be impaired if a marine mammal's auditory sensitivity was reduced either temporarily or - more importantly - permanently (TTS or PTS, respectively).

Hampered Avoidance of Anthropogenic Threats (such as ship strikes, net entanglement)

DFO (2004a) concluded that *"it is a concern that exposure to seismic sound could reduce the ability of marine mammals to avoid anthropogenic threats, but the risk has not been demonstrated."*

While nearly all species of large whale have been victims of collisions with ships (Laist et al. 2001; Jensen and Silber 2003; Vanderlaan and Taggart 2007), right whales are especially vulnerable, likely in large part because of certain characteristic behaviours during which they may be less aware of their surroundings. Controlled exposure experiments in the right whale summer feeding area in the Bay of Fundy showed that right whales did not respond to the playback of the sound made by a 120-m container ship passing within 100 m in spite of the fact that they were apparently able to hear it (Nowacek et al. 2004). When exposed to alert signals, right whales responded by swimming strongly to the surface, a response likely to increase rather than decrease the risk of collision (Nowacek et al. 2004).

beaucoup d'effets sur la détection acoustique passive des proies. Le petit facteur de forme des impulsions signifie que l'audibilité des autres sons est peu touchée pendant les intervalles entre les impulsions.

Pour des raisons analogues, la vulnérabilité aux prédateurs est peu susceptible d'être accrue par l'effet de masquage produit par les impulsions des canons à air. Toutefois, la capacité des animaux de détecter les prédateurs pourrait, du moins en théorie, être réduite si le seuil d'audition d'un mammifère marin est déplacé de façon temporaire (TTS) ou, dans des cas plus graves, de façon permanente (PTS).

Capacité diminuée d'évitement des menaces anthropiques (collision avec des navires, enchevêtrement dans les filets)

Le MPO (2004a) conclut que *« le fait que l'exposition à des bruits sismiques pourrait réduire la capacité des mammifères marins d'éviter des menaces anthropiques est préoccupant, mais le risque n'a pas été prouvé. »*

Bien que presque toutes les espèces de baleines de grande taille soient victimes de collisions avec des navires (Laist *et al.*, 2001; Jensen et Silber, 2003; Vanderlaan et Taggart, 2007), les baleines noires sont particulièrement vulnérables, probablement surtout à cause de certains comportements caractéristiques où elles sont moins à l'affût de ce qui les entoure. Des expériences en milieu contrôlé dans l'aire d'alimentation estivale de la baleine noire, dans la baie de Fundy, ont montré que les baleines noires ne réagissaient pas lorsqu'on leur faisait entendre la reproduction du bruit produit par un navire porte-conteneurs de 120 mètres, à une distance d'environ 100 mètres, malgré le fait qu'elles étaient, selon toute vraisemblance, capables de l'entendre (Nowacek *et al.*, 2004). Lorsqu'elles étaient exposées à des signaux d'alerte, les baleines noires réagissaient en nageant vigoureusement vers la surface, réaction susceptible de faire augmenter plutôt que d'atténuer les risques de collision (Nowacek *et al.*, 2004).

Evidence suggests that a greater rate of mortality and serious injury correlates with a greater vessel speed at the time of a ship strike (Laist et al. 2001; Vanderlaan and Taggart 2007). Most lethal and severe injuries to large whales resulting from documented ship strikes have occurred when vessels were travelling at 14 knots or greater (Laist et al. 2001). Vanderlaan and Taggart (2007), using a logistic regression modelling approach based upon vessel strike records, found that for vessel speeds greater than 15 knots, the probability that a collision will result in a lethal injury (mortality or severely injured) approaches 1. The probability that a collision will result in lethal injury declined to approximately 20 % at speeds of 8.6 knots and to less than 5 % at of 4 knots (Vanderlaan and Taggart 2007). Considering the reduced speed at which seismic survey vessels travel during periods of active seismic surveying (typically 4.5 to 5 knots), plus the extra noise that they emit relative to routine vessel traffic, the risk of lethal injury from a vessel strike, would be limited. However, if exposure to seismic pulses causes TTS or (worse) PTS in marine mammals, this could lead to a reduction in their ability to detect and avoid approaching vessels.

Les données disponibles donnent à penser qu'à des taux plus élevés de mortalité et de blessures graves correspond une plus grande vitesse des navires au moment des collisions (Laist *et al.*, 2001; Vanderlaan et Taggart, 2007). Selon les données disponibles, la plupart des blessures graves ou mortelles chez les baleines de grande taille qui ont été victimes de collisions avec des navires se sont produites alors que les navires allaient à 14 nœuds ou plus (Laist *et al.*, 2001). À l'aide de modèles de régression logistique fondés sur les registres de collisions des navires, Vanderlaan et Taggart (2007) ont découvert que, pour les navires dont la vitesse était supérieure à 15 nœuds, la probabilité qu'une collision entraîne des blessures mortelles (blessures graves ou décès) était près de 1. La probabilité qu'une collision entraîne des blessures mortelles baisse à environ 20 % à une vitesse de 8,6 nœuds et à moins de 5 % à une vitesse de 4 nœuds (Vanderlaan et Taggart, 2007). Compte tenu de la vitesse à laquelle les navires sismiques se déplacent pendant les périodes de prospection (généralement entre 4,5 et 5 nœuds) et le bruit supplémentaire qu'ils produisent en circulant, les risques de blessures mortelles découlant d'une collision devraient être limités. Toutefois, si l'exposition à des impulsions sismiques entraîne un TTS, ou pire, un PTS chez des mammifères marins, la capacité des ces derniers de détecter et d'éviter les navires qui s'approchent pourrait être réduite.

Hampered Parental Care or Bonding

DFO (2004a) concluded that *"it is unknown if exposure to seismic sound can hamper parental care or bonding in marine mammals."*

No studies had, or have since, examined this potential effect.

Capacité diminuée de soigner les petits ou de former des liens parentaux

Le MPO (2004a) conclut que *« on ne sait pas si l'exposition à des bruits sismiques peut réduire la capacité de soin des petits ou de formation de liens parentaux chez les mammifères marins ».*

Aucune étude n'a porté sur ces effets éventuels.

Chronic Effects (e.g., stress-related physiological changes, reduced fecundity)

DFO (2004a) concluded that *"it is unknown if exposure to seismic sound can result in chronic effects, such as immuno-supression or reduced fecundity, on marine mammals."*

Romano et al. (2004) examined the effects of single underwater impulse sounds from a seismic water gun (up to 228 dB re 1 µPa peak-to-peak pressure) and single pure tones (SPL up to 201 dB re 1 µPa) on the nervous and immune systems of a beluga whale and a bottlenose dolphin. They found that neural-immune changes to noise exposure were minimal. Although levels of some stress-released substances (e.g., catecholamines) changed significantly with exposure to sound, levels returned to baseline after 24 hours. Further information about the occurrence of noise-induced stress in marine mammals is not available at this time. Tyack (2008) summarizes evidence from other animals concerning the importance of physiological stress in affecting resilience and fitness, and discusses the potential relevance to marine mammals.

Effets chroniques (changements physiologiques causés par le stress, fécondité réduite)

Le MPO (2004a) conclut que *« on ne sait pas si l'exposition à des bruits sismiques peut résulter en de tels effets chroniques [immunosuppresion ou diminution de la fécondité] chez les mammifères marins ».*

Romano *et al.* (2004) ont examiné les effets des impulsions sonores sous-marines isolées provenant d'un canon à air (pression crête à crête allant jusqu'à 228 dB re 1 µPa) de même que des sons purs isolés (niveau de pression acoustique allant jusqu'à 201 dB re 1 µPa) sur les systèmes nerveux et immunitaire d'un béluga et d'un dauphin à gros nez. Les chercheurs ont noté que les changements d'ordre neuro-immunitaire liés à l'exposition aux bruits étaient minimes. Bien qu'on ait observé un changement significatif de la concentration des substances sécrétées en situation de stress (p. ex. catécholamines) lorsque les animaux étaient exposés aux sons, les concentrations sont revenues à la normale au bout de 24 heures. D'autres renseignements sur l'occurrence du stress causé par le bruit chez les mammifères marins ne sont pas disponibles pour le moment. Tyack (2008) résume les résultats portant sur d'autres animaux et sur l'importance du rôle que joue le stress physiologique sur la résilience et sur la condition physique, et explique en quoi ces résultats sont pertinents pour les mammifères marins.

Indirect Effects (e.g., reduced prey availability)

DFO (2004a) concluded that *it is unknown if exposure to seismic sound can result in indirect effects, such as reduced prey availability (through displacement or reduced catchability) on marine mammals.*

No studies had, or have since, examined this potential indirect effect. Studies of fish responses to airgun pulses often show temporary changes in fish behaviour (e.g., McCauley et al. 2000a,b; Wardle et al.

***Effets indirects* (p. ex. disponibilité réduite de proies)**

Le MPO (2004a) conclut *qu'on ne sait pas si l'exposition à des bruits sismiques peut résulter en de effets indirects sur les mammifères marins, par exemple réduire la disponibilité des proies, soit par déplacement de celles-ci soit par la réduction de leur capturabilité.*

Aucune étude ciblée n'existe concernant cet effet indirect possible. Les études qui portent sur la réponse des poissons aux émissions des canons à air montrent souvent des changements temporaires de comportement

2001; Hassel et al. 2003; Slotte et al. 2004), which in some situations might have short-term consequences for availability of prey to fish-eating marine mammals.

(voir notamment McCauley *et al.*, 2000a, b; Wardle *et al.*, 2001; Hassel *et al.*, 2003; Slotte *et al.*, 2004) qui, dans certaines situations, pourraient avoir des conséquences à court terme sur la disponibilité des proies pour les mammifères marins qui se nourrissent de poissons.

LITERATURE CITED

Arbelo, M., M. Méndez, E. Sierra, P. Castro, J. Jaber, P. Calabuig, M. Carrillo, and A. Fernández. 2005. Novel "gas embolic syndrome" in beaked whales resembling decompression sickness. Abstr. 16th Bienn. Conf. Biol. Mar. Mamm., 12–16 Dec. 2005, San Diego, CA.

Bain, D.E. and R. Williams. 2006. Long-range effects of airgun noise on marine mammals: responses as a function of received sound level and distance. Working Paper SC/58/E35 presented to the IWC Scientific Committee, IWC Annual Meeting, 1-13 June, St. Kitts and Nevis. 13 p.

Barlow, J. and R. Gisiner. 2006. Mitigating, monitoring and assessing the effects of anthropogenic sound on beaked whales. Journal of Cetacean Research and Management 7(3):239-249.

Barrett-Lennard, L.G., J.K.B. Ford, and K.A. Heise. 1996. The mixed blessing of echolocation: differences in sonar use by fish-eating and mammal-eating killer whales. Animal Behaviour 51(3):553-565.

Blackwell, S.B., T.L. McDonald, R.M. Nielson, C.S. Nations, C.R. Greene Jr.,and W.J. Richardson. 2008. Effects of Northstar on bowhead calls, 2001-2004. p. 12-1 to 12-44 In: W.J. Richardson (ed.), Monitoring of industrial sounds, seals, and bowhead whales near BP's Northstar oil development, Alaskan Beaufort Sea, 1999-2004. [Comprehensive report, 3rd update, Feb. 2008]. LGL Rep. P1004. Rep. from LGL Ltd. (King City, Ont.), Greeneridge Sciences Inc. (Santa Barbara, CA), WEST Inc. (Cheyen, WY) and Applied Sociocultural Research (Anchorage, AK) for BP Explor. (Alaska) Inc., Anchorage, AK.

Bowles, A.E., M. Smultea, B. Würsig, D.P. DeMaster, and D. Palka. 1994. Relative abundance and behavior of marine mammals exposed to transmissions from the Heard Island Feasibility Test. Journal of the Acoustical Society of America 6(4):2469-2484.

Caldwell, J. and W. Dragoset. 2000. A brief overview of seismic air-gun arrays. The Leading Edge 19(8,Aug.):898-902.

Citta, J.J., L.T. Quakenbush, R.J. Small, and J.C. George. 2007. Movements of a tagged bowhead whale in the vicinity of a seismic survey in the Beaufort Sea. Poster Paper, Soc. Mar. Mammal. 17th Bien. Meet., Cape Town, South Africa.

Clark, C.W. and W.T. Ellison. 2004. Potential use of low-frequency sounds by baleen whales for probing the environment: Evidence from models and empirical measurements. p. 564-589 In J.A. Thomas, C.F. Moss and M. Vater, (eds.), Echolocation in Bats and Dolphins. University of Chicago Press, Chicago, IL.

Clark, C.W. and G.C. Gagnon. 2006. Considering the temporal and spatial scales of noise exposures from seismic surveys on baleen whales. Intern. Whal. Commis. Working Pap. SC/58/E9. 9 p.

Cox, T.M., T.J. Ragen, A.J. Read, E. Vos, R.W. Baird, K. Balcomb, J. Barlow, J. Caldwell, T. Cranford, L. Crum, A. D'amico, G. D'spain, A. Fernández, J. Finneran, R. Gentry, W. Gerth, F. Gulland, J. Hildebrand, D. Houserp, R. Hullar, P.D. Jepson, D. Ketten, C.D. Macleod, P. Miller,S. Moore, D.C. Mountain, D. Palka, P. Ponganis, S. Rommel, T.

Rowles, B. Taylor, P. Tyack, D. Wartzok, R. Gisiner, J. Meads, and L. Benner. 2006. Understanding the impacts of anthropogenic sound on beaked whales. Journal of Cetacean Research and Management 7(3):177-187.

Deecke, V.B., J.K.B. Ford, and P.J.B. Slater. 2005. The vocal behaviour of mammal-eating killer whales: communicating with costly calls. Animal Behaviour 69(2):395-405.

DFO. 2004a. Review of Scientific Information on Impacts of Seismic Sound on Fish, Invertebrates, Marine Turtles and Marine Mammals. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Habitat Status Report 2004/002.

Dolman, S.J. and M.P. Simmonds. 2006. An updated note on the vulnerability of cetaceans to acoustic disturbance. Paper SC/58/E22 presented to the IWC Scientific Committee, IWC Annual Meeting, 1-13 June, St. Kitts and Nevis.

D'Spain, G.L., A. D'Amico, and D.M. Fromm. 2006. Properties of the underwater sound fields during some well documented beaked whale mass stranding events. Journal of Cetacean Research and Management 7:223-238.

Engel, M.H., M.C.C. Marcondes, C.C.A. Martins, F.O. Luna, R.P. Lima, and A. Campos. 2004. Are seismic surveys responsible for cetacean strandings? An unusual mortality of adult humpback whales in Abrolhos Bank, northeastern coast of Brazil. Working Paper SC/56/E28 presented to the IWC Scientific Committee, IWC Annual Meeting, 19-22 July, Sorrento, Italy. 8p.

Fernández, A., M. Arbelo, R. Deaville, I.A.P. Patterson, P. Castro, J.R. Baker, E. Degollada, H.M. Ross, P. Herráez, A.M. Pocknell, E. Rodríguez, F.E. Howie, A. Espinosa, R.J. Reid, J.R. Jaber, V. Martin, A.A. Cunningham, and P.D. Jepson. 2004. Pathology: whales, sonar and decompression sickness (reply). Nature 28(6984).

Fernández, A., J.F. Edwards, F. Rodriquez, A.E. de los Monteros, P. Herráez, P. Castro, J.R. Jaber, V. Martin, and M. Arbelo. 2005a. "Gas and fat embolic syndrome" involving a mass stranding of beaked whales (Family Ziphiidae) exposed to anthropogenic sonar signals. Veterinary Pathology 42:446-457.

Fernández, A., M. Méndez, E. Sierra, A. Godinho, P. Herráez, A.E. De los Monteros, F. Rodrigues, and M. Arbelo. 2005b. New gas and fat embolic pathology in beaked whales stranded in the Canary Islands. p. 90 In Abstracts of the 16th Biennial Conference on the Biology of Marine Mammals, 12-16 December 2005, San Diego, CA.

Finneran, J.J., C.E. Schlundt, R. Dear, D.A. Carder, and S.H. Ridgway. 2002. Temporary shift in masked hearing thresholds in odontocetes after exposure to single underwater impulses from a seismic watergun. Journal of the Acoustical Society of America 111(6):2929-2940.

Finneran, J.J., D.A. Carder, C.E. Schlundt, and S.H. Ridgway. 2005. Temporary threshold shift in bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) exposed to mid-frequency tones. Journal of the Acoustical Society of America 118(4):2696-2705.

Funk, D. W., R. Rodrigues, D. S. Ireland, and W. R. Koski (eds.). 2007. Joint Monitoring Program in the Chukchi and Beaufort seas, July-November 2006. LGL Alaska Report P891-2, Report from LGL Alaska Research Associates, Inc., LGL Ltd., Greeneridge Sciences, Inc., Bioacoustics Research Program, Cornell University, and Bio-Wave Inc. for

Shell Offshore, Inc., ConocoPhillips Alaska, Inc., and GX Technology, and National Marine Fisheries Service, U.S. Fish and Wildlife Service. 316 p. plus appendices.

Gailey, G., B. Würsig, and T.L. McDonald. 2007. Abundance, behavior, and movement patterns of western gray whales in relation to a 3-D seismic survey, Northeast Sakhalin Island, Russia. Environmental Monitoring and Assessment 134(1-3):75-91. doi: 10.1007/s10661-007-9812-1.

Goold, J.C. and R.F.W. Coates. 2006. Near source, high frequency air-gun signatures. Paper SC/58/E30 presented to the IWC Scientific Committee, IWC Annual Meeting, 1-13 June, St. Kitts and Nevis.

Gordon, J., D. Gillespie, J. Potter, A. Frantzis, M.P. Simmonds, R. Swift, and D. Thompson. 2004. A review of the effects of seismic surveys on marine mammals. Marine Technology Society Journal 37(4):16-34.

Greene, C.R., Jr. and W.J. Richardson. 1988. Characteristics of marine seismic survey sounds in the Beaufort Sea. Journal of the Acoustical Society of America 83:2246-2254.

Greene, C.R., Jr., N.S. Altman, and W.J. Richardson. 1999a. Bowhead whale calls. p. 6-1 – 6-23 In W.J. Richardson, (ed.), Marine mammal and acoustical monitoring of Western Geophysical's open-water seismic program in the Alaskan Beaufort Sea, 1998. LGL Rep. TA2230-3. Prepared by LGL Ltd., King City, ONT, and Greeneridge Sciences Inc., Santa Barbara, CA, for Western Geophysical, Houston, TX, and NMFS, Anchorage, AK, and Silver Spring, MD. 390 p.

Greene, C.R., Jr., N.S. Altman and W.J. Richardson. 1999b. The influence of seismic survey sounds on bowhead whale calling rates. J. Acoust. Soc. Am. 106(4, Pt. 2):2280. [Abstract]

Haley, B., and W.R. Koski. 2004. Marine mammal monitoring during Lamont-Doherty Earth Observatory's seismic program in the Northwest Atlantic Ocean, July–August 2004. LGL Report TA2822-27. Prepared by LGL Ltd. environmental research associates, King City, ONT, for Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, Palisades, NY, and NMFS, Silver Spring, MD. November.

Harris, R.E., G.W. Miller and W.J. Richardson. 2001. Seal responses to airgun sounds during summer seismic surveys in the Alaskan Beaufort Sea. Marine Mammal Science 17(4):795-812.

Harris, R.E., T. Elliot, and R.A. Davis. 2007. Results of mitigation and monitoring program, Beaufort Span 2-D marine seismic program, open-water season 2006. LGL Rep. TA4319-1. Rep. from LGL Ltd., King City, Ont., for GX Technology Corp., Houston, TX. 48 p.

Hassel, A., T. Knutsen, J. Dalen, S. Løkkeborg, K. Skaar, Ø. Østensen, E.K. Haugland, M. Fonn, Å. Høines, and O.A. Misund. 2003. Reaction of sandeel to seismic shooting: A field experiment and fishery statistics study. Institute of Marine Research, Bergen, Norway.

Hildebrand, J.A. 2005. Impacts of anthropogenic sound. p. 101-124 In: J.E. Reynolds III, W.F. Perrin, R.R. Reeves, S. Montgomery, and T.J. Ragen, (eds.), Marine Mammal Research: Conservation beyond Crisis. John Hopkins Univ. Press, Baltimore, MD. 223 p.

Hogarth, W.T. 2002. Declaration of William T. Hogarth in opposition to plaintiff's motion for temporary restraining order, 23 October 2002. Civ. No. 02-05065-JL. U.S. District Court, Northern District of California, San Francisco Div.

Holst, M., M.A. Smultea, W.R. Koski, and B. Haley. 2005a. Marine mammal and sea turtle monitoring during Lamont-Doherty Earth Observatory's marine seismic program off the Northern Yucatán Peninsula in the Southern Gulf of Mexico, January–February 2005. LGL Report TA2822-31. Prepared by LGL Ltd. environmental research associates, King City, ONT, for Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, Palisades, NY, and NMFS, Silver Spring, MD. June. 96 p.

Holst, M., M.A. Smultea, W.R. Koski, and B. Haley. 2005b. Marine mammal and sea turtle monitoring during Lamont-Doherty Earth Observatory's marine seismic program in the Eastern Tropical Pacific Ocean off Central America, November–December 2004. LGL Report TA2822-30. Prepared by LGL Ltd. environmental research associates, King City, ONT, for Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, Palisades, NY, and NMFS, Silver Spring, MD. April. 125 p.

Holst, M., W.J. Richardson, W.R. Koski, M.A. Smultea, B. Haley, M.W. Fitzgerald, and M. Rawson. 2006. Effects of large- and small-source seismic surveys on marine mammals and sea turtles. Eos Transactions of the American Geophysical Union 87(36), Joint Assembly Supplement, Abstract OS42A-01. 23-26 May, Baltimore, MD.

Hooker, S.K., R.W. Baird, S. Al-Omari, S. Gowans, and H. Whitehead. 2001. Behavioural reactions of northern bottlenose whales (*Hyperoodon ampullatus*) to biopsy darting and tag attachment procedures. Fisheries Bulletin 99:303-308.

IAGC. 2004. Further analysis of 2002 Abrolhos Bank, Brazil humpback whale strandings coincident with seismic surveys. Houston, TX.

IWC. 2007. Report of the standing working group on environmental concerns. Annex K to Report of the Scientific Committee. J. Cetac. Res. Manage. 9 (Suppl.):227-260.

Jensen, A.S. and G.K. Silber. 2003. Large whale ship strike database. U.S. Department of Commerce, NOAA Technical Memorandum. NMFS-OPR-. 37p.

Jepson, P.D., M. Arbelo, R. Deaville, I.A.P. Patterson, P. Castro, J.R. Baker, E. Degollada, H.M. Ross, P. Herráez, A.M. Pocknell, F. Rodríguez, F.E. Howie, A. Espinosa, R.J. Reid, J.R. Jaber, V. Martin, A.A. Cunningham, and A. Fernández. 2003. Gas-bubble lesions in stranded cetaceans. Nature 425(6958):575-576.

Jepson, P.D., D.S. Houser, L.A. Crum, P.L. Tyack, and A. Fernández. 2005a. Beaked whales, sonar and the "bubble hypothesis". Abstr. 16th Bienn. Conf. Biol. Mar. Mamm., 12–16 Dec. 2005, San Diego, CA.

Jepson, P.D. R. Deaville, I.A.P. Patterson, A.M. Pocknell, H.M. Ross, J.R. Baker, F.E. Howie, R.J. Reid, A. Colloff, and A.A. Cunningham. 2005b. Acute and chronic gas bubble lesions in cetaceans stranded in the United Kingdom. Vet. Pathol. 42(3):291-305.

Jochens, A., D. Biggs, D. Engelhaupt, J. Gordon, N. Jaquet, M. Johnson, R. Leben, B. Mate, P. Miller, J., Ortega-Ortiz, A., Thode, P. Tyack, J. Wormuth, and B. Würsig. 2006. Sperm

whale seismic study in the Gulf of Mexico; Summary Report, 2002-2004. OCS Study MMS 2006-034. MMS, Gulf of Mexico OCS Region, New Orleans, LA. 345 p.

Johnson, S.R., W.J. Richardson, S.B. Yazvenko, S.A. Blokhin, G. Gailey, M.R. Jenkerson, S.K. Meier, H.R. Melton, M.W. Newcomer, A.S. Perlov, S.A. Rutenko, B. Würsig, C.R. Martin, and E.D. Egging. 2007. A western gray whale mitigation and monitoring program for a 3-D seismic survey, Sakhalin Island, Russia. Environmental Monitoring and Assessment 134(1-3):1-19. doi: 10.1007/s10661-007-9813-0.

Kastak, D., R.L. Schusterman, B.L. Southall, and C.J. Reichmuth. 1999. Underwater temporary threshold shift induced by octave-band noise in three species of pinnipeds. J. Acoust. Soc. Am. 106(2):1142-1148.

Kastak, D., B.L. Southall, R.J. Schusterman, and C. Reichmuth Kastak. 2005. Underwater temporary threshold shift in pinnipeds: effects of noise level and duration. Journal of the Acoustical Society of America 118(5):3154-3163.

Kasuya, T. 1986. Distribution and behavior of Baird's beaked whales off the Pacific coast of Japan. Sci. Rep. Whales Res. Inst. 37:61-83.

Ketten, D.R. 1995. Estimates of blast injury and acoustic trauma zones for marine mammals from underwater explosions. p. 391-407 In R.A. Kastelein, J.A. Thomas, and P.E. Nachtigall, (eds.), Sensory Systems of Aquatic Mammals. De Spil Publishers, Woerden, Netherlands.

Ketten, D.R., J. Lien and S. Todd. 1993. Blast injury in humpback whale ears: evidence and implications. Journal of the Acoustical Society of America 94(3, Pt. 2):1849-1850. (Abstract)

Ketten, D.R., J. O'Malley, P.W.B. Moore, S. Ridgway, and C. Merigo. 2001. Aging, injury, disease, and noise in marine mammal ears. J. Acoust. Soc. Am. 110(5, Pt. 2):2721.

Kryter, K.D. 1985. The Effects of Noise on Man. 2nd edition. Academic Press, Orlando, FL. 688p.

Laist, D.W., A.R. Knowlton, J.G. Mead, A.S. Collet and M. Podesta. 2001. Collisions between ships and whales. Marine Mammal Science 17(1): 35-75.

Lawson, J., I. McQuinn, 2004. Review of the Potential Hydrophysical-related Issues in Canada, Risks to Marine Mammals, and Monitoring and Mitigation Strategies for Seismic Activities. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2004/121.

Ljungblad, D.K., B. Würsig, S.L. Swartz, and J.M. Keene. 1988. Observations on the behavioral responses of bowhead whales (*Balaena mysticetus*) to active geophysical vessels in the Alaskan Beaufort Sea. Arctic 41(3):183-194.

Lucke, K., P.A. Lepper, M.-A. Blanchet and U. Siebert. 2007. Testing the auditory tolerance of harbour porpoise hearing for impulsive sounds. Poster Paper presented at Conference on Noise and Aquatic Life, Nyborg, Denmark, Aug. 2007.

MacLean, S.A. and W.R. Koski. 2005. Marine mammal monitoring during Lamont-Doherty Earth Observatory's seismic program in the Gulf of Alaska, August–September 2004. LGL

Report TA2822-28. Prepared by LGL Ltd. environmental research associates, King City, ONT, for Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, Palisades, NY, and NMFS, Silver Spring, MD. 102 p.

Madsen, P.T., B. Mohl, B.K. Nielsen, and M. Wahlberg. 2002. Male sperm whale behavior during exposures to distant seismic survey pulses. Aquatic Mammals 28(3):231-240.

Malme, C.I., P.R. Miles, C.W. Clark, P. Tyack, and J.E. Bird. 1984. Investigations of the potential effects of underwater noise from petroleum industry activities on migrating gray whale behavior/Phase II: January 1984 migration. BBN Report 5586. Prepared by Bolt Beranek & Newman Inc., Cambridge, MA, for MMS, Alaska OCS Region, Anchorage, AK.

Malme, C.I., P.R. Miles, P. Tyack, C.W. Clark, and J.E. Bird. 1985. Investigation of the potential effects of underwater noise from petroleum industry activities on feeding humpback whale behavior. BBN Report 5851; OCS Study MMS 85-0019. Prepared by BBN Labs Inc., Cambridge, MA, for MMS, Anchorage, AK.

Malme, C.I., B. Würsig, J.E. Bird, and P. Tyack. 1986. Behavioral responses of gray whales to industrial noise: feeding observations and predictive modeling. Outer Continental Shelf Environmental Assessment Program, Final Report. BBN Rep. 6265. OCS Study MMS 88-0048. Prepared by BBN Labs Inc., Cambridge, MA, for NMFS and MMS, Anchorage, AK.

Malme, C.I., B. Würsig, B., J.E. Bird, and P. Tyack. 1988. Observations of feeding gray whale responses to controlled industrial noise exposure. p. 55-73 In W.M. Sackinger, M.O. Jeffries, J.L. Imm, and S.D. Treacy,(eds.), Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions. Vol. II. Symposium on Noise and Marine Mammals. University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, AK.

McCauley, R.D., M.-N. Jenner, C. Jenner, K.A. McCabe, and J. Murdoch. 1998. The response of humpback whales (*Megaptera novaeangliae*) to offshore seismic survey noise: preliminary results of observations about a working seismic vessel and experimental exposures. APPEA (Austral. Petrol. Product. Explor. Assoc.) Journal 38:692-707.

McCauley, R.D., J. Fewtrell, A.J. Duncan, C. Jenner, M.-N. Jenner, J.D. Penrose, R.I.T. Prince, A. Adhitya, J. Murdoch, and K. McCabe. 2000a. Marine seismic surveys: Analysis of airgun signals; and effects of air gun exposure on humpback whales, sea turtles, fishes and squid. Report from Centre for Marine Science and Technology, Curtin University, Perth, Western Australia, for Australian Petroleum Production Association, Sydney, NSW. 188 p.

McCauley, R.D., J. Fewtrell, A.J. Duncan, M.-N. Jenner, M-N., C. Jenner, R.I.T. Prince, A. Adhitya, K. McCabe and J. Murdoch. 2000b. Marine seismic surveys - a study of environmental implications. APPEA (Austral. Petrol. Product. Explor. Assoc.) Journal 40(May):692-708.

McCauley, R.D. and J.R. Hughes. 2006. Marine seismic mitigation measures – perspectives in 2006. Paper SC/58/E44 presented to the IWC Scientific Committee, June 2006 (unpublished), 10 p. Paper available from the IWC Secretariat: secretariat@iwcoffice.org.International Whaling.

McDonald, M.A., J.A. Hildebrand, and S.C. Webb. 1995. Blue and fin whales observed on a seafloor array in the Northeast Pacific. Journal of the Acoustical Society of America 98(2, Pt. 1):712-721.

Méndez, M., M. Arbelo, E. Sierra, A. Godinho, M.J. Caballero, J. Jaber, P. Herráez, and A. Fernández. 2005. Lung fat embolism in cetaceans stranded in Canary Islands. Abstr. 16th Bienn. Conf. Biol. Mar. Mamm. 12–16 Dec. 2005, San Diego, CA.

Miller, G.W., R.E. Elliott, W.R. Koski, V.D. Moulton, and W.J. Richardson. 1999. Whales. p. 5-1 – 5-109 In W.J. Richardson, (ed.), Marine mammal and acoustical monitoring of Western Geophysical's open-water seismic program in the Alaskan Beaufort Sea, 1998. LGL Report TA2230-3. Prepared by LGL Ltd., King City, ONT, and Greeneridge Sciences Inc., Santa Barbara, CA, for Western Geophysical, Houston, TX, and NMFS, Anchorage, AK, and Silver Spring, MD. 390 p.

Miller, J.H., A.E. Bowles, B.L. Southall, R.L. Gentry, W.T. Ellison, J.J. Finneran, C.R. Greene Jr., D. Kastak, D.R. Ketten, P.L. Tyack, P.E. Nachtigall, W.J. Richardson and J.A. Thomas. 2005a. Strategies for weighting exposure in the development of acoustic criteria for marine mammals. Journal of the Acoustical Society of America 118:2019 (Abstract). Presentation available at: http://www.oce.uri.edu/faculty_pages/miller/Noise_Weighting_10_18_2005.ppt. (accessed March 10, 2009)

Miller, P.J., P.L. Tyack, M.P. Johnson, P.T. Madsen, and R. King. 2006. Techniques to assess and mitigate the environmental risk posed by use of airguns: recent advances from academic research programs. Eos Transactions of the American Geophysical Union 87(36), Joint Assembly Supplement, Abstract S42A-03. 23-26 May 2006, Baltimore, MD.

Mooney, T.A., P.E. Nachtigall, W.W.L. Au, M. Breese, and S. Vlachos. 2005. Bottlenose dolphins: effects of noise duration, intensity, and frequency. p. 197 In Abstracts of the 16th Biennial Conference on the Biology of Marine Mammals, 12-16 December 2005, San Diego, CA.

Moore, S.E. and Angliss, R.P. 2006. Overview of planned seismic surveys offshore northern Alaska, July-October 2006. Paper SC/58/E6 presented to IWC Scientific Committee, IWC Annual Meeting, 1-13 June, St Kitts and Nevis.

Moulton, V.D. and J.W. Lawson. 2002. Seals, 2001. p. 3-1 to 3-48 In: W.J. Richardson (ed.), Marine mammal and acoustical monitoring of WesternGeco's open-water seismic program in the Alaskan Beaufort Sea, 2001. LGL Rep. TA2564-3. Rep. from LGL Ltd., King City, Ont., and Greeneridge Sciences Inc., Santa Barbara, CA, for Western Geophysical, Houston, TX, and Nat. Mar. Fish. Serv., Anchorage, AK, and Silver Spring, MD.

Moulton, V.D. and G.W. Miller. 2005. Marine mammal monitoring of a seismic survey on the Scotian Slope, 2003. p. 29-40. In: Lee, K., H. Bain and G.V. Hurley (eds.), Acoustic monitoring and marine mammal surveys in the Gully and Outer Scotian Shelf before and during active seismic programs. Env. Stud. Res. Funds Rep. No. 151. 154 p. + xx.

Moulton, V.D., B.D. Mactavish and R.A. Buchanan. 2005. Marine mammal and seabird monitoring of Chevron Canada Resources' 3-D seismic program on the Orphan Basin, 2004. LGL Rep. SA817. Rep. by LGL Limited, St. John's, NL, for Chevron Canada

Resources, Calgary, AB, ExxonMobil Canada Ltd., St. John's, NL, and Imperial Oil Resources Ventures Ltd., Calgary, AB. 90 p. + appendices.

Moulton, V.D., B.D. Mactavish, R.E. Harris and R.A. Buchanan. 2006a. Marine mammal and seabird monitoring of Chevron Canada Limited's 3-D seismic program on the Orphan Basin, 2005. LGL Rep. SA843. Rep. by LGL Limited, St. John's, NL, for Chevron Canada Resources, Calgary, AB, ExxonMobil Canada Ltd., St. John's, NL, and Imperial Oil Resources Ventures Ltd., Calgary, AB. 111 p. + appendices.

Moulton, V.D., B.D. Mactavish and R.A. Buchanan. 2006b. Marine mammal and seabird monitoring of ConocoPhillips' 3-D seismic program in the Laurentian Sub-basin, 2005. LGL Rep. SA849. Rep. by LGL Limited, St. John's, NL, for ConocoPhillips Canada Resources Corporation, Calgary, AB. 97 p. + appendices.

Nieukirk, S.L., K.M. Stafford, D.K. Mellinger, R.P. Dziak, and C.G. Fox. 2004. Low-frequency whale and seismic airgun sounds recorded in the mid-Atlantic Ocean. Journal of the Acoustical Society of America 115(4):1832-1843.

NMFS. 1995. Small takes of marine mammals incidental to specified activities; offshore seismic activities in southern California. Federal Register 60(200, 17 Oct.):53753-53760.

NMFS. 2000. Small takes of marine mammals incidental to specified activities; marine seismic-reflection data collection in southern California. Federal Register 65(60, 28 Mar.):16374-16379.

NMFS. 2005. Endangered fish and wildlife; notice of intent to prepare an environmental impact statement. Fed. Regist. 70(7, 11 Jan.):1871-1875.

Nowacek, D.P., M.P. Johnson and P.L. Tyack. 2004. North Atlantic right whales (*Eubalaena glacialis*) ignore ships but respond to alerting stimuli. Proceedings: Biological Sciences 271(1536): 227-231.

Nowacek, D.P., L.H. Thorne, D.W. Johnston, and P.L. Tyack. 2007. Responses of cetaceans to anthropogenic noise. Mammal Rev. 37(2):81-115.

NRC. 2005. Marine mammal populations and ocean noise, determining when noise causes biologically significant effects. The National Academy Press, Washington, DC.

Potter, J.R. 2004. A possible mechanism for acoustic triggering of decompression sickness symptoms in deep-diving marine mammals. Paper presented to the 2004 IEEE International Symposium on Underwater Technology, Taipei, Taiwan, 19–23 April 2004. Available at http://www.zifios.com/documentos-oficiales/documentos/Singapore_John_R_Potter_UT04.pdf. (accessed March 10, 2009)

Reeves, R.R., E. Mitchell, and H. Whitehead. 1993. Status of the northern bottlenose whale, *Hyperoodon ampullatus*. Canadian Field-Naturalist 107:490-508.

Richardson, W.J., B. Würsig, and C.R. Greene. 1986. Reactions of bowhead whales, *Balaena mysticetus*, to seismic exploration in the Canadian Beaufort Sea. Journal of the Acoustical Society of America 79(4):1117-1128.

Richardson, W.J., C.R. Greene, Jr., C.I. Malme, and D.H. Thomson. 1995. Marine Mammals and Noise. Academic Press, San Diego, CA. 576 p.

Richardson, W.J., G.W. Miller, and C.R. Greene, Jr. 1999. Displacement of migrating bowhead whales by sounds from seismic surveys in shallow waters of the Beaufort Sea. Journal of the Acoustical Society of America 106(4, Pt. 2):2281. (Abstract)

Riedman, M.L. 1983. Studies of the effects of experimentally produced noise associated with oil and gas exploration and development on sea otters in California. Rep. from Center for Coastal Marine Studies, Univ. Calif. Santa Cruz, CA, for U.S. Minerals Manage. Serv., Anchorage, AK. 92 p.

Riedman, M.L. 1984. Appendix D/Effects of sounds associated with petroleum industry activities on the behavior of sea otters in California. In: Malme, C.I., P.R. Miles, C.W. Clark, P. Tyack and J.E. Bird (eds.), Investigations of the potential effects of underwater noise from petroleum industry activities on migrating gray whale behavior Phase II: January 1984 migration. Rep. from Bolt Beranek and Newman Inc., Cambridge, MA, for U.S. Minerals Manage. Serv., Anchorage, AK. D-1 to D-12 p.

Romano, T.A., M.J. Keogh, C.Kelly, P. Feng, L. Berk, C.E. Schlundt, D.A. Carder, and J.J. Finneran. 2004. Anthropogenic sound and marine mammal health: measures of the nervous and immune systems before and after intense sound exposure. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 61:1124-1134.

Rutenko, A.N., S.V. Borisov, A.V. Gritsenko, and M.R. Jenkerson. 2007. Calibrating and monitoring the western gray whale mitigation zone and estimating acoustic transmission during a 3D seismic survey, Sakhalin Island, Russia. Environmental Monitoring and Assessment 134(1-3):21-44.

Slotte, A., K. Hansen, J. Dalen, and E. Ona. 2004. Acoustic mapping of pelagic fish distribution and abundance in relation to a seismic shooting area off the Norwegian coast. Fish. Res. 67: 143-150.

Smultea, M.A., M. Holst, W.R. Koski, and S. Stoltz. 2004. Marine mammal monitoring during Lamont-Doherty Earth Observatory's seismic program in the Southeast Caribbean Sea and adjacent Atlantic Ocean, April-June 2004. LGL Report TA2822-26. Prepared by LGL Ltd. environmental research associates, King City, ONT, for L-DEO, Columbia University, Palisades, NY. 106 p.

Sorensen, P.W., R.J. Medved, M.A.M. Hyman and H.E. Winn. 1984. Distribution and abundance of cetaceans in the vicinity of human activities along the continental shelf of the northwestern Atlantic. Marine Environmental Research 12(1):69-81.Southall, B.L., A.E. Bowles, W.T. Ellison, J.J. Finneran, R.L. Gentry, C.R. Greene Jr., D. Kastak, D.R. Ketten, J.H. Miller, P.E. Nachtigall, W.J. Richardson, J.A. Thomas, and P.L. Tyack. 2007. Marine mammal noise exposure criteria: initial scientific recommendations. Aquatic Mammals 33(4):411-522.

Southall, B.L., A.E. Bowles, W.T. Ellison, J.J. Finneran, R.L. Gentry, C.R. Greene, Jr., D. Kastak, D.R. Ketten, J.H. Miller, P.E. Nachtigall, W.J. Richardson, J.A. Thomas and P.L. Tyack. 2007. Marine mammal noise exposure criteria: initial scientific recommendations. Aquatic Mammals 33(4):411-522.

Stone, C.J. 2003. The effects of seismic activity on marine mammals in UK waters 1998-2000. JNCC Report 323. Joint Nature Conservation Committee, Aberdeen, Scotland.

Stone, C.J. and M.L. Tasker. 2006. The effects of seismic airguns on cetaceans in UK waters. J. Cetacean Res. Manage. 8(3):255-263.

Tyack, P.L. 2008. Implications for marine mammals of large-scale changes in the marine acoustic environment. Journal of Mammalogy 89(3):549-558.

Tyack, P., M. Johnson, and P. Miller. 2003. Tracking responses of sperm whales to experimental exposures of airguns. p. 115-120 In A.E. Jochens and D.C. Biggs, (eds.), Sperm whale seismic study in the Gulf of Mexico/Annual Report: Year 1. OCS Study MMS 2003-069. Prepared by Texas A&M University, College Station, TX, for MMS, Gulf of Mexico OCS Region, New Orleans, LA.

Vanderlaan, A.S.M. and C.T. Taggart. 2007. Vessel collisions with whales: the probability of lethal injury based on vessel speed. Marine Mammal Science 23(1): 144-156.

Wardle, C.S., T.J. Carter, G.G. Urquhart, A.D.F. Johnstone, A.M. Ziolkowski, G. Hampson and D. Mackie. 2001. Effects of seismic air guns on marine fish. Cont. Shelf Res. 21(8-10): 1005-1027.

Wartzok, D., A.N. Popper, J. Gordon, and J. Merrill. 2004. Factors affecting the responses of marine mammals to acoustic disturbance. Mar. Technology Soc. J. 37(4):6-15.

Weilgart, L.S. 2007. The impacts of anthropogenic ocean noise on cetaceans and implications for management. Canadian Journal of Zoology 85(11):1091-1116.

Weir, C.R. 2008. Overt responses of humpback whales (*Megaptera novaeangliae*), sperm whales (*Physeter macrocephalus*), and Atlantic spotted dolphins (*Stenella frontalis*) to seismic exploration off Angola. Aquatic Mammals 34(1):71-83.

Weir, C.R. and S.J. Dolman. 2007. Comparative review of the regional marine mammal mitigation guidelines implemented during industrial seismic surveys, and guidance towards a worldwide standard. Journal of International Wildlife Law and Policy 10(1):1-27.

Wilson, J., L. Rotterman, and D. Epperson. 2006. Minerals Management Service overview of seismic survey mitigation and monitoring on the U.S. Outer Continental Shelf. Paper SC/58/E8 presented to IWC Scientific Committee, IWC Annual Meeting, 1-13 June, St. Kitts and Nevis.

Würsig, B., S.K. Lynn, T.A. Jefferson, and K.D. Mullin. 1998. Behaviour of cetaceans in the northern Gulf of Mexico relative to survey ships and aircraft. Aquatic Mammals 24(1):41-50.

Yazvenko, S.B., T.L. McDonald, S.A. Blokhin, S.R. Johnson, S.K. Meier, H.R. Melton, M.W. Newcomer, R. Nielson, V.L Vladimirov, and P.W. Wainwright. 2007a. Distribution and abundance of western gray whales during a seismic survey near Sakhalin Island, Russia. Environmental Monitoring and Assessment 134(1-3):45-73. doi: 10.1007/s10661-007-9809-9.

Yazvenko, S.B., T.L. McDonald, S.A. Blokhin, S.R. Johnson, H.R. Melton, M.W. Newcomer, R. Nielson, and P.W. Wainwright. 2007b. Feeding of western gray whales during a seismic survey near Sakhalin Island, Russia. Environmental Monitoring and Assessment 134(1-3):93-106. doi: 10.1007/s10661-007-9810-3.

Yoder, J.A. 2002. Declaration of James A. Yoder in opposition to plaintiff's motion for temporary restraining order, 28 October 2002. Civ. No. 02-05065-JL. U.S. District Court, Northern District of California, San Francisco Division.

APPENDIX A: CHARACTERISTICS OF AIRGUN PULSES

Airguns function by venting high-pressure air into the water. The pressure signature of an individual airgun consists of a sharp rise and then fall in pressure, followed by several positive and negative pressure excursions caused by oscillation of the resulting air bubble. The sizes, arrangement, and firing times of the individual airguns in an array are designed and synchronized to suppress the pressure oscillations subsequent to the first cycle. The resulting downward-directed pulse lasts only 10 to 20 ms, with only one strong positive and one strong negative peak pressure (Caldwell and Dragoset 2000).

The predominant energy emitted from airguns is at relatively low frequencies. For example, typical high-energy airgun arrays emit most energy at 10–120 Hz. However, the pulses contain some energy up to 500–1,000 Hz and above (Goold and Fish 1998; Potter et al. 2007). Substantial high-frequency energy output of up to 150 kHz was found during tests of 60 in^3 and 250 in^3 airguns (Goold and Coates 2006). In fact, the output of these airguns covered the entire frequency range known to be used by marine mammals. This output included substantial energy levels as to be clearly audible to most, if not all, cetacean species (Goold and Coates 2006). Other recent studies—including controlled studies of sperm whales in the Gulf of Mexico (Tyack et al. 2006)—have also found that airgun arrays exposed animals to significant sound energy above 500 Hz (Goold and Fish 1998; Sodal 1999). These data increase concerns about the potential impacts of seismic sounds on odontocetes with poor low-frequency hearing but good higher-frequency hearing.

Levels of anthropogenic underwater sounds, including those produced by seismic surveys, have been increasing worldwide. Concurrently, there is growing concern by the general public, researchers, government entities, and others regarding exposure of marine mammals to these sounds (e.g., Hildebrand 2004; Marine Technology Society 2004; Simmonds et al. 2006). In a comparison of anthropogenic underwater sound sources, airgun arrays worldwide were estimated to introduce 3.9 x 1013 Joules of energy into the ocean, second only to the potential release of energy from underwater nuclear explosions and ranking above military sonars (Moore and Angliss 2006). As a result, there has been increasing interest in and studies on methods to estimate the numbers of animals exposed to various sound levels and to mitigate exposure to these sounds (e.g., Hollingshead and Harrison 2005).

Recent attention has focused on developing sound exposure criteria appropriate to the acoustic sensitivities of various marine mammal groups and species (e.g., Hollingshead and Harrison 2005; Miller et al. 2005; Southall et al. 2007). These exposure criteria have important implications for identifying appropriate "safety radii" and sound exposure limits, including balancing mitigation with goals of geophysical seismic studies conducted by industry, universities and others (e.g., Barton et al. 2006). Various empirical data are being collected, and modeling and predictions of the propagation and received levels of airgun sounds are being developed and applied (e.g., Breitzke et al. 2006; Diebold et al. 2006; Frankel et al. 2006; Miller et al. 2006; Racca et al. 2006; Turner et al. 2006; Tyack et al. 2006). These recent studies are affecting the way underwater sound is modeled. For example, DeRuiter et al. (2005) reported that on-axis source levels and spherical spreading assumptions alone insufficiently describe airgun pulse propagation and the extent of exposure zones.

Several important mitigating factors need to be kept in mind regarding the characteristics of seismic airgun arrays compared to other types of underwater anthropogenic sounds. (1) Airgun arrays produce intermittent sounds involving emission of a strong sound pulse for a small fraction of a second followed by several seconds of near silence. In contrast, some other sources produce sounds with lower peak levels that are continuous or discontinuous, but persist

for much longer durations than seismic pulses. (2) Airgun arrays are designed to transmit strong sounds downward through the seafloor, and the amount of sound transmitted in near-horizontal directions is considerably reduced. Nonetheless, they also emit sounds that travel horizontally toward non-target areas. (3) An airgun array is a distributed source, not a point source. The nominal source level is an estimate of the sound that would be measured from a theoretical point source emitting the same total energy as the airgun array. That figure is useful in calculating the expected received levels in the far field (i.e., at moderate and long distances). However, because the airgun array is not a single point source, there is no one location within the near field (or anywhere else) where the received level is as high as the nominal source level.

The strengths of airgun pulses can be measured in different ways, and it is important to know which method is being used when interpreting quoted source or received levels. Geophysicists usually quote peak-to-peak levels, in bar-meters or (less often) dB re 1 µPa-1 m. The peak (= 0-to-peak) level for the same pulse is typically about 6 dB less. In the biological literature, levels of received airgun pulses are often described based on the "average" or "root-mean-square" (rms) level, where the average is calculated over the time interval encompassing 90% of the total acoustic energy from a single pulse. The rms value for a given airgun pulse is typically about 10 dB lower than the peak level, and 16 dB lower than the peak-to-peak value (Greene 1997; McCauley et al. 1998, 2000). A fourth measure that is increasingly being used is the energy, or sound exposure level (SEL), in dB re 1 $\mu Pa^2 \cdot s$. Because the pulses are <1 s in duration, the numerical value of the SEL energy value is lower than the rms pressure level but the units are different. Because the level of a given pulse will differ substantially depending on which of these measures is being applied, it is important to be aware which measure is in use when interpreting any quoted pulse level. In the past, NMFS has commonly referred to rms levels when discussing levels of pulsed sounds that might "harass" marine mammals, but SEL values are coming into wider use for this purpose.

Seismic sound received at any given point will arrive in several ways. These include sound arriving via a direct path through the water, indirect paths that include reflection from the sea surface and bottom, and other indirect paths including transmission through the bottom sediments. Sounds propagating via indirect paths travel longer distances and often arrive later than sounds arriving via a direct path. (However, sound traveling in the bottom may travel faster than that in the water, and thus may, in some situations, arrive slightly earlier than sound traveling along the direct path despite traveling a greater distance.) These variations in travel time effectively lengthen the duration of the received pulse, or may cause two or more received pulses from a single emitted pulse. Near the source, the predominant part of a seismic pulse is about 10–20 ms in duration. In comparison, the pulse duration as received at long horizontal distances can be much greater. For example, for one airgun array operating in the Beaufort Sea, pulse duration was about 300 ms at a distance of 8 km, 500 ms at 20 km, and 850 ms at 73 km (Greene and Richardson 1988).

An important aspect of sound propagation is that received levels of low-frequency underwater sounds diminish close to the water's surface because of pressure-release and interference phenomena that occur at and near the surface (Urick 1983; Richardson et al. 1995). Paired measurements of received airgun sounds at depths of 3 m vs. 9 m or 18 m have shown that received levels are typically several decibels lower at 3 m (Greene and Richardson 1988). For a marine mammal at the surface, whose auditory organs are within 0.5–1 m of the surface, the received level of the predominant low-frequency components of the airgun pulses would be further reduced. Conversely, in deep water, the received levels at deep depths can be considerably higher than those at relatively shallow (e.g., 18 m) depths and the same horizontal distance from the airguns (Tolstoy et al. 2004a, b).

In addition, research conducted in shallow-water environments has recently shown that when the seafloor is within the near field of the source array, the associated partitioning of energy can cause uncharacteristically rapid loss of energy with distance (Diebold et al. 2006). These data suggest that, in some shallow water environments, recent mitigation measures may be more conservative than necessary. Empirical site-specific data collected in situ may facilitate identification of the most appropriate safety radii in these shallow-water and other environments (Turner et al. 2006).

Recent reports suggest that monitoring seismic airgun sound over broad areas may be needed to determine the scale of potential effects of seismic surveys (e.g., Bain and Williams 2006). Pulses of underwater sound from open-water seismic exploration are often detected 50–100 km from the source location, even during operations in nearshore waters (Greene and Richardson 1988; Burgess and Greene 1999). At those distances, the received levels are low: <120 dB re 1 μPa_{rms}. However, faint seismic pulses are sometimes detectable at even greater ranges (e.g., Bowles et al. 1994; Fox et al. 2002). In fact, recent data show that, in deep water areas, low-frequency airgun signals can sometimes be detected thousands of kilometres from their source. For example, sound from seismic surveys conducted offshore of Nova Scotia, the coast of western Africa, and northeast of Brazil were reported as a dominant feature of the underwater noise field recorded along the mid-Atlantic ridge (Nieukirk et al. 2004). In addition, considerably higher levels can occur at distances out to several kilometres from an operating airgun array. A further consideration is that, with depending on propagation conditions, received levels are not necessarily a simple declining function of distance. For example, Madsen et al. (2006) reported that received levels of the first arrivals of seismic pulses at 12 km were as high as received levels 2 km from the seismic array. In some situations, secondary sound arrivals can have higher received levels at 5–12.6 km from the source than they do at ranges closer to (Madsen et al. 2006).

Literature Cited

Bain, D.E. and R. Williams. 2006. Long-range effects of airgun noise on marine mammals: responses as a function of received sound level and distance. Paper SC/58/E35 presented to the IWC Scientific Committee, IWC Annual Meeting, 1-13 June, St. Kitts and Nevis. 13 p.

Barton, P., J. Diebold, and S. Gulick. 2006. Balancing mitigation against impact: a case study from the 2005 Chicxulub seismic survey. Eos Transactions of the American Geophysical Union 87(36), Joint Assembly Supplement, Abstract OS41A-04. 23-26 May, Baltimore, MD.

Bowles, A.E., M. Smultea, B. Würsig, D.P. DeMaster, and D. Palka. 1994. Relative abundance and behavior of marine mammals exposed to transmissions from the Heard Island Feasibility Test. Journal of the Acoustical Society of America 96(4):2469-2484.

Breitzke, M., O. Boebel, S. El Naggar, W. Jokat, G. Kuhn, F. Niessen, H. Schenke, B. Werner, and J. Diebold. 2006. Broadband sound pressure field characteristics of marine seismic sources used by R/V Polarstern. Eos

Transactions of the American Geophysical Union 87(36), Joint Assembly Supplement, Abstract OS41A-02. 23-26 May, Baltimore, MD.

Burgess, W.C. and C.R. Greene, Jr. 1999. Physical acoustics measurements. p. 3-1 – 3-63 In W.J. Richardson, (ed.), Marine mammal and acoustical monitoring of Western Geophysical's open-water seismic program in the Alaskan Beaufort Sea, 1998. LGL Rep. TA2230. Prepared

by LGL Ltd., King City, ON, and Greeneridge Sciences, Inc., Santa Barbara, CA, for Western Geophysical, Houston, TX, and NMFS, Anchorage, AK, and Silver Spring, MD.

Caldwell, J. and W. Dragoset. 2000. A brief overview of seismic air-gun arrays. The Leading Edge 19(8, Aug.):898-902.

DeRuiter, S.L., Y-T. Lin, A.E. Newhall, P.T. Madsen, P.J.O. Miller, J.F. Lynch, and P.L. Tyack. 2005. Quantification and acoustic propagation modeling of airgun noise recorded on DTAG-tagged sperm whales in the Gulf of Mexico. p. 73 In Abstracts of the 16th Biennial Conference on the Biology of Marine Mammals, 12-16 December, San Diego, CA.

Diebold, J.B., M. Tolstoy, P.J. Barton, and S.P. Gulick. 2006. Propagation of exploration seismic sources in shallow water. Eos Transactions of the American Geophysical Union 87(36), Joint Assembly Supplement, Abstract OS41A-03. 23-26 May, Baltimore, MD.

Fox, C.G., R.P. Dziak, and H. Matsumoto. 2002. NOAA efforts in monitoring of low-frequency sound in the global ocean. Journal of the Acoustical Society of America 112:2260. (Abstract).

Frankel, A., W.J. Richardson, S. Carr, R. Spaulding, and W. Ellison. 2006. Estimating the acoustic exposure of marine mammals to seismic sources of the R/V Maurice Langseth. Eos Transactions of the American Geophysical Union 87(36), Joint Assembly Supplement, Abstract OS42A-05. 23-26 May, Baltimore, MD.

Goold, J.C. and P.J. Fish. 1998. Broadband spectra of seismic survey air-gun emissions, with reference to dolphin auditory thresholds. Journal of the Acoustical Society of America 103:2177-2184.

Goold, J.C. and R.F.W. Coates. 2006. Near source, high frequency air-gun signatures. Paper SC/58/E30 presented to the IWC Scientific Committee, IWC Annual Meeting, 1-13 June, St. Kitts and Nevis.

Greene, C.R., Jr. 1997. An autonomous acoustic recorder for shallow arctic waters. Journal of the Acoustical Society of America 102(5, Pt.2):3197.

Greene, C.R., Jr. and W.J. Richardson. 1988. Characteristics of marine seismic survey sounds in the Beaufort Sea. Journal of the Acoustical Society of America 83:2246-2254.

Hildebrand, J. 2004. Sources of anthropogenic noise in the marine environment. Paper presented at the International Policy Workshop on Sound and Marine Mammals, London, September 28-30. Held by Marine Mammal Commission and Joint Nature Conservation Committee.

Hollingshead, K R. and J. Harrison. 2005. Taking marine mammals incidental to maritime activities: an "insurance policy" for scientific, industrial and military maritime activities? p. 129 In Abstracts of the 16th Biennial Conference on the Biology of Marine Mammals, 12-16 December, San Diego, CA.

Madsen, P.T., M. Johnson, P.J.O. Miller, N. Aguilar de Soto, J. Lynch, and P.L. Tyack. 2006. Quantitative measures of air gun pulses recorded on sperm whales (Physeter macrocephalus) using acoustic tags during controlled exposure experiments. Journal of the Acoustical Society of America 120(4):2366–2379.

Marine Technology Society. 2004. Human-generated ocean sound and the effects on marine life. Marine Technology Society Journal 7:1-82.

McCauley, R.D., M.-N. Jenner, C. Jenner, K.A. McCabe, and J. Murdoch. 1998. The response of humpback whales (Megaptera novaeangliae) to offshore seismic survey noise: preliminary results of observations about a working seismic vessel and experimental exposures. APPEA (Austral. Petrol. Product. Explor. Assoc.) Journal 38:692-707.

McCauley, R.D., J. Fewtrell, A.J. Duncan, C. Jenner, M.-N. Jenner, J.D. Penrose, R.I.T. Prince, A. Adhitya, J.Murdoch, and K. McCabe. 2000. Marine seismic surveys: Analysis of airgun signals; and effects of air gun exposure on humpback whales, sea turtles, fishes and squid. Report from Centre for Marine Science and Technology, Curtin University, Perth, Western Australia, for Australian Petroleum Production Association, Sydney, NSW.

Miller, J.H., A.E. Bowles, B.L. Southall, R.L. Gentry, W.T. Ellison, J.J. Finneran, C.R. Greene Jr., D. Kastak, D.R. Ketten, P.L. Tyack, P.E. Nachtigall, W.J. Richardson and J.A. Thomas. 2005. Strategies for weighting exposure in the development of acoustic criteria for marine mammals. Journal of the Acoustical Society of America 118:2019 (Abstract). Presentation available at: http:/www.oce.uri.edu/faculty_pages/miller/Noise_Weighting_ 10_18_2005.ppt.

Miller, P.J., P.L. Tyack, M.P. Johnson, P.T. Madsen, and R. King. 2006. Techniques to assess and mitigate the environmental risk posed by use of airguns: recent advances from academic research programs. Eos Transactions of the American Geophysical Union 87(36), Joint Assembly Supplement, Abstract OS42A-03. 23-26 May 2006, Baltimore, MD.

Moore, S.E. and Angliss, R.P. 2006. Overview of planned seismic surveys offshore northern Alaska, July-October 2006. Paper SC/58/E6 presented to IWC Scientific Committee, IWC Annual Meeting, 1-13 June, St Kitts and Nevis.

Nieukirk, S.L., K.M. Stafford, D.K. Mellinger, R.P. Dziak, and C.G. Fox. 2004. Low-frequency whale and seismic airgun sounds recorded in the mid-Atlantic Ocean. Journal of the Acoustical Society of America 115(4):1832-1843.

Potter, J.R., M. Thillet, C. Douglas, M. Chitre, Z. Doborzynski, and P. Seekings. 2007. Visual and passive acoustic marine mammal observations and high-frequency seismic source characteristics recorded during a seismic survey. IEEE Journal of Oceanic Engineering 32(2):469-483.

Racca, R., D. Hannay, and S. Carr. 2006. Current state of acoustic wave propagation modeling and its use in the estimation of impact on marine mammals. Eos Transactions of the American Geophysical Union 87(36), Joint Assembly Supplement, Abstract OS42A-04. 23-26 May, Baltimore, MD.

Richardson, W.J., C.R. Greene, Jr., C.I. Malme, and D.H. Thomson. 1995. Marine Mammals and Noise. Academic Press, San Diego, CA. 576 p.

Simmonds, M.P., S.J. Dolman, and L. Weilgart, eds. 2006. Oceans of Noise 2004: A WDCS Science Report. Whale and Dolphin Conservation Society, Chippenham, UK.

Sodal, A. 1999. Measured underwater acoustic wave propagation from a seismic source. Proceedings of the Airgun Environmental Workshop, 6 July, London, UK.

Southall, B.L., A.E. Bowles, W.T. Ellison, J.J. Finneran, R.L. Gentry, C.R. Greene, Jr., D. Kastak, D.R. Ketten, J.H. Miller, P.E. Nachtigall, W.J. Richardson, J.A. Thomas and P.L. Tyack. 2007. Marine mammal noise exposure criteria: initial scientific recommendations. Aquatic Mammals 33(4):411-522.

Tolstoy, M., J. Diebold, S. Webb, D. Bohnenstiehl, and E. Chapp. 2004a. Acoustic calibration measurements. Chapter 3 In: W.J. Richardson, ed. Marine mammal and acoustic monitoring during Lamont-Doherty Earth Observatory's acoustic calibration study in the northern Gulf of Mexico, 2003. Revised. Prepared by LGL Ltd., King City, ONT, for Lamont-Doherty Earth Observatory, Palisades, NY, and NMFS, Silver Spring, MD.

Tolstoy, M., J.B. Diebold, S.C. Webb, D.R. Bohenstiehl, E. Chapp, R.C. Holmes, and M. Rawson. 2004b. Broadband calibration of R/V Ewing seismic sources. Geophysical Research Letters 31:L14310.

Turner, S., M. Zykov, and A. MacGillivray. 2006. Preliminary acoustic level measurements of airgun sources from ConocoPhillips' 2006 seismic survey in Alaskan Chukchi Sea. Prepared by JASCO Research Ltd., Victoria, BC.

Tyack, P.L., M.P. Johnson, P.T. Madsen, P.J. Miller, and J. Lynch. 2006. Biological significance of acoustic impacts on marine mammals: examples using an acoustic recording tag to define acoustic exposure of sperm whales, Physeter catodon, exposed to airgun sounds in controlled exposure experiments. Eos Transactions of the American Geophysical Union 87(36), Joint Assembly Supplement, Abstract OS42A-02. 23-26 May, Baltimore, MD.

Urick, R.J. 1983. Principles of Underwater Sound. 3rd edition. Peninsula Publishing, Los Altos, CA. 423 p.

APPENDIX B: HEARING ABILITIES OF MARINE MAMMALS

The hearing abilities of marine mammals are functions of the following (Richardson et al. 1995; Au et al. 2000):

1. Absolute hearing threshold (the level of sound barely audible in the presence of significant ambient noise) at the frequency in question. The "best frequency" is the frequency with the lowest absolute threshold.

2. Critical ratio (the signal-to-noise ratio required to detect a sound at a specific frequency in the presence of background noise around that frequency).

3. The ability to localize sound direction at the frequencies under consideration.

4. The ability to discriminate among sounds of different frequencies and intensities.

Marine mammals rely on the use of underwater sounds to communicate and gain information about their surroundings. Experiments also show that they hear and may react to many anthropogenic sounds including sounds made during seismic exploration. Seismic surveys often use sonar systems simultaneously with airguns; however, the majority of studies that have examined the potential impacts of seismic surveys on marine mammals have focused on the impacts of airguns rather than sonar.

Baleen Whales (Mysticetes)

The hearing abilities of mysticetes have not been studied directly. However, the anatomy of the baleen whale inner ear seems to be well adapted for detection of low-frequency sounds (Ketten 1991, 1992, 1994, 2000). Behavioural evidence also indicates that they hear well at low frequencies <1 kHz (see Richardson et al. 1995). The sound levels that they can detect below 1 kHz are probably limited by increasing levels of natural ambient noise at decreasing frequencies; at frequencies below 1 kHz, natural ambient levels tend to increase (see Richardson et al. 1995; Clark and Ellison 2004).

The hearing systems of mysticetes are thought to be more sensitive to low-frequency sounds than are the ears of the small odontocetes that have been studied directly. Thus, mysticetes are likely to hear airgun pulses farther away than can small odontocetes and, at closer distances, airgun sounds may seem more prominent to mysticetes than to odontocetes. However, mysticetes have commonly been seen well within the distances where seismic sounds would be detectable and yet often show no overt reaction to those sounds. Behavioural responses by mysticetes to seismic pulses have been documented, but received levels of pulsed sounds necessary to elicit behavioural reactions are typically well above the assumed minimum detectable levels (Malme et al. 1984, 1988; Richardson et al. 1986, 1995; McCauley et al. 2000; Johnson et al. 2007).

However, some studies do suggest that mysticetes may also be able to hear and respond to much higher frequency sounds. Mysticetes produce sounds at frequencies up to 8 kHz and, for humpback whales, to >24 kHz (Au et al. 2001, 2006). Watkins (1986) noted that some mysticetes reacted to pinger sounds up to 28 kHz, but not to pingers or sonars emitting sounds at >36 kHz. Todd et al. (1992) reported that mysticetes reacted to sonar sounds at 3.5 kHz when received levels were 80–90 dB re 1 µPa. Migrating gray whales reacted to a 21–25 kHz whale-finding sonar with a source level of 215 dB re 1 µPa-m (Frankel 2005). Southall et al.

(2007) concluded that the functional hearing range for ysticetes as a group is from about 7 Hz to 22 kHz.

Toothed Whales (Odontocetes)

Hearing abilities of some odontocetes have been studied in detail (reviewed by Richardson et al. 1995; Au et al. 2000; Southall et al. 2007). Hearing sensitivities as a function of frequency have been determined for several species. The small- to moderate-sized odontocetes that have been the subject of audiology studies have relatively poor hearing sensitivity at frequencies below 1 kHz, but extremely good sensitivity at and above several kHz. There are very few data on the absolute hearing thresholds of most of the larger, deep-diving odontocetes, such as the sperm and beaked whales. However, Mann et al. (2005) and Cook et al. (2006) both report that a Gervais' beaked whale showed evoked potentials from 5–80 kHz, with the best sensitivity at 40–80 kHz. Southall et al. (2007) concluded that the functional hearing range for "mid-frequency" and "high-frequency" cetaceans as groups are from about 150 Hz to 160 kHz and from about 200 Hz to 180 kHz, respectively.

Despite the relatively poor sensitivity of small odontocetes at the low frequencies that contribute most of the energy in pulses of sound from airgun arrays, the sounds are sufficiently strong that their received levels sometimes remain above the hearing thresholds of odontocetes at distances out to several tens of kilometres (Richardson and Würsig 1997). However, there is no evidence that small odontocetes react to airgun pulses at such long distances, or even (with the exception of belugas.Miller et al. 2005) at intermediate distances where sound levels are well above the ambient noise level.

Seals and Sea Lions (Pinnipeds)

Behavioural measures of hearing are available for five species of earless seals (phocids), two species of eared seals (otariids), and the walrus (reviewed in Richardson et al. 1995:211ff.; Kastak and Schusterman 1998, 1999; Kastelein et al. 2002; Southall et al. 2007). In comparison with odontocetes, pinnipeds tend to have lower best frequencies, lower high-frequency cutoffs, better auditory sensitivity at low frequencies, and poorer sensitivity at the best frequency. In particular phocid seals have better sensitivity at low frequencies (1 kHz) than do odontocetes.

Below 30–50 kHz, the hearing thresholds of most tested pinniped species are essentially flat down to about 1 kHz, and range from 60–85 dB re 1 µPa. Measurements for a harbour seal indicate that, below 1 kHz, its thresholds deteriorate (increase) gradually to ~97 dB re 1 µPa at 100 Hz (Kastak and
Schusterman 1998). The northern elephant seal appears to have better underwater sensitivity than does the harbour seal, at least at low frequencies (Kastak and Schusterman 1998, 1999). For the otariids, the high frequency cutoff is lower, and the sensitivity at low frequencies (e.g., 100 Hz) is poorer than for phocids, at least for harbour and elephant seals.

The underwater hearing of a walrus has been measured at frequencies from 125 Hz to 15 kHz (Kastelein et al. 2002). The range of best hearing was 1–12 kHz, with maximum sensitivity (67 dB re 1µPa) occurring at 12 kHz.

Southall et al. (2007) concluded that the functional hearing range for pinnipeds in water as a group is from about 75 Hz to 75 kHz. This range is primarily based on data for phocids, and as such, would be lower for otariids.

Sea Otter and Polar Bear (Fissipeds)

No data are available on the hearing abilities of sea otters (Ketten 1998), although the in-air vocalizations of sea otters have most of their energy concentrated at 3 to 5 kHz (McShane et al. 1995; Thomson and Richardson 1995). Sea otter vocalizations are considered to be most suitable for short-range communication among individuals (McShane et al. 1995).

Data on the specific hearing capabilities of polar bears are also largely lacking. A recent study of in-air hearing of polar bears involved use of the auditory evoked potential method while tone pips were played to anesthetized bears (Nachtigall et al. 2007). Hearing was tested in ½ octave steps from 1 to 22.5 kHz and best hearing sensitivity was found between 11.2 and 22.5 kHz. These data suggest that polar bears have sensitive hearing over a wide frequency range.

Polar bear behaviour (e.g., remaining on the ice, at the water surface, or on land) reduces or avoids their exposure to underwater sounds. Similarly, the tendency of sea otters to be at the water surface (or on land) much of the time would reduce their exposure to underwater sounds.

Literature Cited

Au, W.W.L., A.N. Popper, and R.R. Fay. 2000. Hearing by Whales and Dolphins. Springer Handbook of Auditory Research Volume 12. Springer-Verlag, New York, NY. 458 p.

Au, W., J. Darling, and K. Andrews. 2001. High-frequency harmonics and source level of humpback whale songs. Journal of the Acoustical Society of America 110:2770.

Au, W.W.L., A.A. Pack, M.O. Lammers, L.M. Herman, M.H. Deakos and K. Andrews. 2006. Acoustic properties of humpback whale songs. J. Acoust. Soc. Am. 120(2):1103-1110.

Clark, C.W. and W.T. Ellison. 2004. Potential use of low-frequency sounds by baleen whales for probing the environment: Evidence from models and empirical measurements. p. 564-589 In J.A. Thomas, C.F. Moss and M. Vater, (eds.), Echolocation in Bats and Dolphins. University of Chicago Press, Chicago, IL.

Cook, M.L.H., R.A. Varela, J.D. Goldstein, S.D. McCulloch, G.D. Bossart, J.J. Finneran, D. Houser, and A. Mann. 2006. Beaked whale auditory evoked potential hearing measurements. Journal of Comparative Physiology A 192:489-495.

Frankel, A.S. 2005. Gray whales hear and respond to a 21–25 kHz high-frequency whale-finding sonar. Page 97 in Abstracts of the 16th Biennial Conference on the Biology of Marine Mammals, 12-16 December 2005, San Diego, CA.

Johnson, S.R., W.J. Richardson, S.B. Yazvenko, S.A. Blokhin, G. Gailey, M.R. Jenkerson, S.K. Meier, H.R. Melton, M.W. Newcomer, A.S. Perlov, S.A. Rutenko, B. Würsig, C.R. Martin, and E.D. Egging. 2007. A western gray whale mitigation and monitoring program for a 3-D seismic survey, Sakhalin Island, Russia. Environmental Monitoring and Assessment 134(1-3):1-19.

Kastak, D. and R.J. Schustermn. 1998. Low-frequency amphibious hearing in pinnipeds: methods, measurements, noise and ecology. Journal of the Acoustical Society of America 103: 2216-2228.

Kastak, D. and R.J. Schusterman. 1999. In-air and underwater hearing sensitivity of a northern elephant seal (Mirounga angustirostris). Canadian Journal of Zoology 77:1751-1758.

Kastelein, R.A., P. Mosterd, B. van Santen, M. Hagedoorn, and D. de Haan. 2002. Underwater audiogram of a Pacific walrus (Odobenus rosmarus divergens) measured with narrow-band frequency-modulated signals. Journal of the Acoustical Society of America 112:2173-2182.

Ketten, D.R. 1991. The marine mammal ear: specializations for aquatic audition and echolocation. p. 717-750 In D. Webster, R. Fay and A. Popper, (eds.) The Biology of Hearing. Springer-Verlag, Berlin.

Ketten, D.R. 1992. The cetacean ear: form, frequency, and evolution. p. 53-75 In J.A. Thomas, R.A. Kastelein, and
A. Ya Supin, (eds.), Marine Mammal Sensory Systems. Plenum, New York.

Ketten, D.R. 1994. Functional analysis of whale ears: adaptations for underwater hearing. IEEE Proceedings of Underwater Acoustics 1:264-270.

Ketten, D.R. 1998. Marine mammal auditory systems: a summary of audiometric and anatomical data and its implications for underwater acoustic impacts. NOAA Technical Memorandum NOAA-TM-NMFS-SWFSC-256. Southwest Fisheries Science Center, La Jolla, CA.

Ketten, D.R. 2000. Cetacean ears. p. 43-108 In W.W.L. Au, A.N. Popper, and R.R. Fay, (eds.), Hearing by Whales and Dolphins. Springer-Verlag, New York.

Malme, C.I., P.R. Miles, C.W. Clark, P. Tyack, and J.E. Bird. 1984. Investigations of the potential effects of underwater noise from petroleum industry activities on migrating gray whale behavior/Phase II: January 1984 migration. BBN Report 5586. Prepared by Bolt Beranek & Newman Inc., Cambridge, MA, for MMS,Alaska OCS Region, Anchorage, AK.

Malme, C.I., B. Würsig, B., J.E. Bird, and P. Tyack. 1988. Observations of feeding gray whale responses to controlled industrial noise exposure. p. 55-73 In W.M. Sackinger, M.O. Jeffries, J.L. Imm, and S.D. Treacy, (eds.), Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions. Vol. II. Symposium on Noise and Marine Mammals. University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, AK.

Mann, D.A., R.A. Varela, J.D. Goldstein, S.D. McCulloch, G.D. Bossart, J.J. Finneran, D. Houser, and M.L.H. Cook. 2005. Gervais' beaked whale auditory evoked potential hearing measurements. p. 178-179 In Abstracts of the 16th Biennial Conference on the Biology of Marine Mammals, 12-16 December 2005, San
Diego, CA.

McCauley, R.D., J. Fewtrell, A.J. Duncan, C. Jenner, M.-N. Jenner, J.D. Penrose, R.I.T. Prince, A. Adhitya, J.Murdoch, and K. McCabe. 2000. Marine seismic surveys: Analysis of airgun signals; and effects of air gun exposure on humpback whales, sea turtles, fishes and squid. Report from Centre for Marine Science and Technology, Curtin University, Perth, Western Australia, for Australian Petroleum Production Association, Sydney, NSW.

McShane, L.J., J.A. Estes, M.L. Riedman, and M.M. Staedler. 1995. Repertoire, structure, and individual variation of vocalizations in the sea otter. Journal of Mammalogy 76:414-427.

Miller, G.W., V.D. Moulton, R.A. Davis, M. Holst, P. Millman, A. MacGillivray, and D. Hannay. 2005. Monitoring seismic effects on marine mammals—southeastern Beaufort Sea, 2001-2002. p. 511-542 In S.L. Armsworthy, P.J. Cranford, and K. Lee, (eds.), Offshore Oil and Gas Environmental Effects Monitoring/Approaches and Technologies. Battelle Press, Columbus, OH.

Nachtigall, P.E., A.Y. Supin, M. Amundin, B. Röken,,T. Møller, A. Mooney, K.A. Taylor, and M. Yuen. 2007. Polar bear Ursus maritimus hearing measured with auditory evoked potentials. Journal of Experimental Biology 210:1116-1122.

Richardson, W.J. and B. Würsig. 1997. Influences of man-made noise and other human actions on cetacean behaviour. Marine and Freshwater Behavioral Physiology 29:183-209.

Richardson, W.J., B. Würsig, and C.R. Greene. 1986. Reactions of bowhead whales, Balaena mysticetus, to seismic exploration in the Canadian Beaufort Sea. Journal of the Acoustical Society of America 79:1117-1128.

Richardson, W.J., C.R. Greene, Jr., C.I. Malme, and D.H. Thomson. 1995. Marine Mammals and Noise. Academic Press, San Diego, CA. 576 p.
Southall, B.L., A.E. Bowles, W.T. Ellison, J.J. Finneran, R.L. Gentry, C.R. Greene, Jr., D. Kastak, D.R. Ketten, J.H. Miller, P.E. Nachtigall, W.J. Richardson, J.A. Thomas and P.L. Tyack. 2007. Marine mammal noise exposure criteria: initial scientific recommendations. Aquatic Mammals 33(4):411-522.

Thomson, D.H. and W.J. Richardson. 1995. Marine mammal sounds. p. 159-204 In W.J. Richardson, C.R. Greene, Jr., C.I. Malme, and D.H. Thomson, Marine Mammals and Noise. Academic Press, San Diego, CA. 576 p.

Todd, S., J. Lien, and A. Verhulst. 1992. Orientation of humpback whales (Megaptera novaengliae) and minke whales (Balaenoptera acutorostrata) to acoustic alarm devices designed to reduce entrapment in fishing gear. Pages 727-739 in J.A. Thomas, R.A. Kastelein, and A. Ya. Supin, eds. Marine Mammal Sensory
Systems. Plenum, New York.

Watkins, W.A. 1986. Whale reactions to human activities in Cape Cod waters. Marine Mammal Science 2:251-262.